

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Química

122

TEORIA, DISEÑO Y DETERMINACION DE FACTORES
DE CORRECCION DE UN VISCOSIMETRO CAPILAR

T E S I S

Que para obtener el titulo de

INGENIERO QUIMICO

p r e s e n t a

ANDRES AGUSTIN GARCIA REJON GUTIERREZ

México, D. F.

Julio 1974



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Tesi(s)

CLAS. _____
AÑO M.t. 1008 121
FECHA _____
PROC. 1979



QUIMICA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.

FACULTAD DE QUIMICA.

TEORIA, DISEÑO Y DETERMINACION DE FACTORES
DE CORRECCION DE UN VISCOSIMETRO CAPILAR.

ANDRES AGUSTIN GARCIA REJON GUTIERREZ.

INGENIERO QUIMICO.

1974.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE	DR. MARTIN HERNANDEZ LUNA.
VOCAL	DR. ENRICO MARTINEZ SAENZ.
SECRETARIO	DR. RAFAEL MORONES ESCOBAR.
1er. SUPLENTE	ENRIQUE JIMENEZ RUIZ.
2o. SUPLENTE	RUBEN BERRA GARCIA COSS.

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

LABORATORIO DE INGENIERIA QUIMICA.

DIRECTOR DE TESIS: M.C. CESAR A. GARCIA FRANCO.

A MIS PADRES

A MARICRUZ

A JAVIER, EDUARDO, AGUSTIN Y
GUSTAVO.

A CESAR A. GARCIA FRANCO POR HABER DESPERTADO
EN MI EL INTERES POR LA INVESTIGACION.

TU

A LOS DOCTORES ENRICO MARTINEZ S. Y RAFAEL HORONES E.
MI AGRADECIMIENTO POR SU DESINTERESADA Y VALIOSA AYUDA.

AGRADEZCO A LAS AUTORIDADES DE LA DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES,
EN ESPECIAL AL JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA, DR.
MARTIN HERNANDEZ LUNA, SU AYUDA PARA LA REALIZACION DE ESTE TRABAJO.

INDICE :

	Página
Introducción	1
I) Fluidos	4
II) Viscosímetros	35
III) Flujo de Poiseuille	51
IV) Equipo y materiales	72
V) Resultados experimentales	82
Bibliografía	189
Apéndice "A"	192
Apéndice "B"	197

INDICE DE FIGURAS.

Figura	I.1	Perfil de Velocidad.	6
Figura	I.2	Fluidos Independientes del tiempo	11
Figura	I.3	Ley de la potencia	15
Figura	I.4	Fluidos Tixotrópicos	21
Figura	I.5	Modelo de Voigt	23
Figura	I.6	Deformación en un sólido de Voigt	25
Figura	I.7	sólido de Voigt	25
Figura	I.8	Modelo generalizado de Voigt	26
Figura	I.9	Modelo de Maxwell	28
Figura	I.10	Deformación de un modelo de Maxwell	30
Figura	I.11	Modelo generalizado de Maxwell	31
Figura	I.13	Modelos	34
Figura	III.3	Viscosímetro de Disco Giratorio	37
Figura	III.1	Viscosímetro de Cilindros Ceniciales	38
Figura	III.2	Viscosímetro Brookfield	38
Figura	III.4	Viscosímetros: Círculo y Placa, Doble Círculo y Cenocilíndrico	40
Figura	III.5	Viscosímetros	
Figura	III.6	Capilares	45
Figura	III.7	Efectos de extremo en los Viscosímetros Capilares	46

Figura	III.1	Flujo en un tubo	51
Figura	III.2	Efectos en la frontera límite	56
Figura	III.3	Corrección por efectos	58
Figura	III.4	de entrada	60
Figura	III.5	Deformación en un sólido	65
Figura	III.6	Corrección por Energía elástica	70
Figura	IV.1	Viscosímetro Capilar	72 ^a
Figura	IV.2	Pieza Intercambiadora de Capilar- res	73 ^a
Figura	IV.3	Vista de frente del equipo	75
Figura	IV.4	Vista lateral del equipo	76
Figura	IV.5	Diagrama de Flujo	76

ÍNDICE DE TABLAS.

SOLUCIÓN 0.67 % CMC.

Tabla A1	Corrección por Energía Cinética	93
A3	Factor de Corrección	97
A4	$\zeta \omega$ vs. $\dot{\gamma}$	98
A5	$f(\zeta \omega)$	100
A6	Viscosidad	102
A7	$\zeta \omega$	104
A8	Cálculo de n'	106
A9, A10	Viscosidad	107

Las tablas con el mismo número corresponden a los mismos cálculos, sólo que para diferentes soluciones.

SOLUCIÓN 1.5 % CMC.

Tabla B1		108
B3		113
B4		114
B5		116
B6		118
B7		120
B8		122
B9, B10		123

SOLUCION 3.0 % CMC.

Tabla C1	124
C3	129
C4	130
C5	132
C6	134
C7	136
C8	138
C9,C10	139

SOLUCION 1.5 % POLIOX.

Tabla D1	140
D3	145
D4	146
D5	148
D6	150
D7	152
D8	154
D9,D10	155

SOLUCION 2.5 % POLIOX.

Tabla E1	156
E3	160
E4	161
E5	163
E6	165

Tabla E7	167
E8	169
E9, E10	170

SOLUCION 3.5 % POLIOX

Tabla F1	171
F3	175
F4	176
F5	178
F6	180
F7	182
F8	184
F9, F10	185

ACEITE PEMEX SOL SAE 50

Tabla G1	Viscosidad	186
----------	------------	-----

INDICE DE GRAFICAS.

SOLUCION 0.67 % CMC.

Gráfica A1	$\Delta P^4 \sim \dot{V}$	95
A2	$\Delta P^4 \sim L/D$	96
A3	$\dot{V} \sim \zeta w$	99
A4	Curva de Flujo	101
A5	Ley de la Potencia	103
A7	Cálculo de n'	105

Las gráficas con el mismo número corresponden a los mismos cálculos, sólo que para diferentes soluciones.

SOLUCION 1.5 % CMC.

Gráfica B1		111
B2		112
B3		115
B4		117
B5		119
B7		121

SOLUCION 3.0 % CMC.

Gráfica C1	127
C2	128
C3	131
C4	133
C5	135
C7	137

SOLUCION 1.5 % POLIOX.

Gráfica D1	143
D2	144
D3	147
D4	149
D5	151
D7	153

SOLUCION 2.5 % POLIOX.

Gráfica E1	158
E2	159
E3	162
E4	164
E5	166
E7	168

SOLUCION 3.5 % POLIOX.

Gráfica F1	173
F2	174
F3	177
F4	179
F5	181
F7	183

SOLUCION ACEITE PEMEX SOL SAE 50.

Gráfica G1	Curva de Flujo	188
------------	----------------	-----

NOMENCLATURA.

A,B : Constantes.

D : Diámetro.

E : Energía Elástica.

F : Fuerza.

G : Módulo de Rígidez.

k : Índice de Consistencia.

L : Longitud.

L_e : Longitud de Entrada.

m : Factor.

n : Índice de Flujo.

n' : Corrección de Bagley.

n^t : Pendiente de la gráfica $\log \zeta \omega$ vs. $\log \gamma$.

P : Presión.

Q : Gasto volumétrico.

R,r : Radio.

S : Esfuerzo cortante aplicado.

t : Tiempo.

v : Velocidad.

I₁, I₂, I₃ : Invariantes del tensor de Deformación.

M : Torque.

ΔP : Caída de presión.

ΔP* : Caída de presión corregida.

σ_w : Esfuerzo recobrable.

α : Tiempo de retardamiento.

β : Engrosamiento.

γ : Deformación.

$\frac{d\sigma_w}{dy} = \gamma$: Rapidez de Deformación o de Corte.

δ_{ij} : Delta de Kroenecker.

Δ_{ij} : Tensor de Deformación.

$f(\epsilon_w)$: Rapidez de Corte corregida.

η : Viscosidad No-Newtoniana.

λ : Tiempo de relajación.

μ : Viscosidad Newtoniana.

μ_∞ : " cuando el esfuerzo tiende a ∞ .

μ_0 : " "

ρ : Densidad.

$\phi(t)$: Función Creep.

$\psi(t)$: Función de Relajación.

τ_{yx} : Esfuerzo cortante.

ϵ_0 : " límite.

ζ_{ij} : Tensor de esfuerzo cortante.

ζ_w : Esfuerzo cortante en la pared.

$\tau_{\parallel\parallel}$: Esfuerzo normal.

ω : Velocidad Angular.

INTRODUCCION.

La Reología, la ciencia de la deformación y el flujo, ha adquirido una gran importancia en los últimos años.

Este hecho se refleja cada vez más en la práctica del Ingeniero Químico, particularmente en la solución de algunos problemas de flujo de fluidos, en el procesado de polímeros, de materiales en la industria alimenticia,etc., ya que provee de las armas necesarias para alcanzar ese objetivo.

Entre estas armas se tiene la posibilidad de conocer algunas propiedades de los materiales en cuestión mediante experimentos simples y directos. Por ejemplo, la determinación de la viscosidad como propiedad de transporte de momentum se lleva a cabo a través de la obtención de la curva de flujo de algún material particular, usando un viscosímetro adecuado.

La presente tesis tiene por objeto la construcción y operación de un viscosímetro capilar. La razón por la cual ha sido desarrollado este trabajo radica en la importancia que tiene el disponer de un aparato, de bajo costo y fácil operación, en el Laboratorio de Ingeniería Química, para la determinación de la viscosidad de fluidos Newtonianos y No-Newtonianos. Este aparato ha sido escogido por su versatilidad y por proporcionar datos de mayor interés y utilidad para el Ingeniero Químico.

El presente trabajo esta dividido en 2 partes fundamentales:
Aspecto Teórico y Aspecto Experimental.

Dentro del aspecto teórico hemos considerado pertinente dar una breve introducción a los conceptos básicos de la Reología y a los diferentes aparatos que existen para determinar propiedades reológicas de materiales, antes de entrar de lleno a tratar el tema del viscosímetro capilar.

La parte teórica relacionada con el viscosímetro capilar fué desarrollada en base a ciertas suposiciones que gobiernan el flujo de un fluido en un tubo capilar. Se hace énfasis en la obtención de los factores de corrección empleados para corregir los datos experimentales directos. En este punto se presentan dos métodos, el de Bagley y el de Brodkey-Metzger, los cuales se analizan y se presentan sus ventajas y desventajas.

El aspecto experimental consta a su vez de dos partes:
Construcción del aparato y Técnica experimental.

En la parte referente a la construcción del aparato se citan todos los elementos que lo forman, sus especificaciones y disposición dentro del sistema completo.

La técnica experimental abarca todos los aspectos, desde la preparación de las soluciones acuosas de los dos polímeros empleados hasta la técnica operatoria del viscosímetro en sí. De los resultados experimentales discutidos en el capítulo V podemos concluir

que los objetivos fijados en este trabajo, es decir, la construcción y operación satisfactoria de un viscosímetro capilar, se llevan plenamente.

Esto no quiere decir que el trabajo de investigación en esta área esté terminado. Por el contrario esta tesis pretende ser el primer paso hacia la construcción de un viscosímetro capilar un poco más sofisticado y exacto, que permita iniciar un estudio más profundo de las propiedades reológicas de los materiales y abrir un poco el horizonte para ver la importancia de la Reología dentro de la Investigación Científica en la actualidad.

CAPITULO I

FLUIDOS

1) INTRODUCCION:

La Reología es el estudio de la deformación y el flujo de materia.

A pesar de su evidente importancia esta ciencia se encuentra en sus comienzos en cuanto a su habilidad para proporcionar predicciones del comportamiento de sistemas reales.

La Reología abarca en su estudio una amplia gama de materiales que van desde el sólido Hookeano en un extremo hasta el fluido Newtoniano en el otro. Dentro de este rango tenemos por ejemplo a los fluidos No-Newtonianos viscosos, a los materiales viscoelásticos, etc.

En la mecánica de fluidos, el fluido Newtoniano ha sido considerado como normal y los fluidos que se alejan de este comportamiento han sido llamados anormales. Desgraciadamente los fluidos "anormales" o No-Newtonianos se encuentran cada vez más en las industrias químicas y es de vital importancia para el Ingeniero Químico el estar familiarizado con el comportamiento de estos materiales.

Por otra parte, el considerar el estudio de una clase de fluidos general nos proporcionaría una visión más amplia de la macá-

nica de fluidos, en donde el fluido Newtoniano sería un caso particular muy simplificado.

Hasta ahora el estudio de los fluidos No-Newtonianos ha tenido dos enfoques:

a) La interpretación del patrón de flujo de un fluido, en términos de sus propiedades químicas y físicas y

b) El establecimiento de ecuaciones constitutivas que proponen el carácter invariante a la transformación de los sistemas de referencia y capaces de describir el comportamiento de estos materiales en la realidad.

Para aclarar más la dificultad que existe para encontrar ecuaciones constitutivas adecuadas citamos algunas de las características que deben llenar estos modelos:

i) Invariantes a transformación de coordenadas (Notación Tensorial).

ii) Predecir viscosidades dependientes de la rapidez de corte.

iii) Predecir esfuerzos normales en esfuerzo permanente.

iv) Conjuntar los experimentos dinámicos de la viscoelasticidad lineal.

v) Explicar el fenómeno de esfuerzo-relajamiento.

vi) Ser explícita con constantes definidas para aplicarse a datos experimentales.

Este capítulo tiene como objeto mostrar una clasificación

de los materiales No-Newtonianos y Viscoelásticos, en base a sus propiedades físicas y químicas y los modelos que se han establecido para su caracterización.

Para el caso de los fluidos Newtonianos, se establecerá el siguiente:

2) CARACTERISTICAS FISICOQUÍMICAS DE LOS MATERIALES.

a) FLUIDOS NEWTONIANOS:

Para analizar el comportamiento de estos materiales consideraremos el siguiente arreglo:

Un fluido se encuentra colocado entre dos placas paralelas separadas por una distancia pequeña. Si una de las placas es puesta en movimiento, en el fluido se establecerá un perfil de velocidades lineal, como se muestra en la figura I.1.

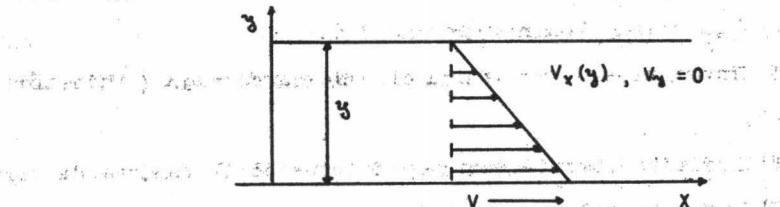


Fig. I.1

Si consideramos que un esfuerzo cortante simple (capas paralelas de fluido que resbalan una sobre otra) debe de ser aplicado para mantener el perfil de velocidades, podemos deducir que ese esfuerzo cortante debe ser proporcional a la variación de la velocidad con respecto a la variación de la distancia entre las placas.

La expresión matemática que relaciona este fenómeno es conocida como la Ley de Newton de la viscosidad.

$$\tau_{yx} = \mu \frac{dv_x}{dy} \quad (I2.1)$$

donde μ cts. de proporcionalidad.

Se debe hacer notar que τ_{yx} es el flux de momentum en la dirección Y debido a un gradiente de velocidad en la dirección X. Esta ley fué enunciada por Issac Newton en 1687 en su obra "Principia" de la siguiente manera: "La resistencia producida por la necesidad de lubricación de las partes de un fluido es, siendo igual en ellas, proporcional a la velocidad con que las partes del fluido están separadas una de la otra.

De otra manera esto quiere decir que el esfuerzo cortante τ_{yx} es directamente proporcional a la rapidez de corte ($\frac{dv_x}{dy}$).

Otra manera de expresar esta ley es la siguiente:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (I2.2)$$

$\dot{\gamma}$: rapidez de deformación.

Esto se obtiene de considerar que:

$$\frac{dv_x}{dy} = \frac{d}{dy} \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{dx}{dy} \quad (I2.2')$$

$$\therefore \tau = \mu \frac{dv_x}{dy} = \mu \frac{d}{dt} \frac{dx}{dy}$$

Si definimos la deformación en un punto como:

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial x}{\partial y} \quad ; \quad \dot{\gamma} = \frac{d}{dt} \frac{\partial x}{\partial y} \quad (I2.2'')$$

Combinando las ecuaciones (I2.2') y (I2.2'') obtenemos la ecuación (I2.2)

Las dos ecuaciones anteriores se basan en la suposición de esfuerzo cortante simple. La ecuación realógica general para el fluido Newtoniano es (1):

$$\tau_{ij} = \mu \Delta_{ij} + (K - \frac{2}{3}\mu)(\nabla \cdot \vec{v}) \delta_{ij}$$

donde

$$\tau_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} = \text{Tensor de Esfuerzo Cortante} \quad (I2.3)$$

$$\Delta_{ij} = \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right]$$

Tensor de Deformación

$$\delta_{ij} = 0 \quad i \neq j$$

$$\delta_{ij} = 1 \quad i=j$$

Delta de Kronecker

K viscosidad mísica (Resistencia viscosa al cambio de volumen).

Si el material en cuestión es un fluido incompresible la ecuación (I2.3) se simplifica para obtener

$$\tau_{ij} = \mu \Delta_{ij} \quad \tau_{yx} = \mu \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \right] \quad (I2.4)$$

y luego para esfuerzo cortante simple ($v_y = 0$)

$$\tau_{yx} = \mu \frac{dv_x}{dy} \quad (I2.1)$$

Este desarrollo se encuentra en el Apéndice A.

b) FLUIDOS NO-NEWTONIANOS:

Los fluidos No-Newtonianos son aquellos fluidos en los cuales la viscosidad no es constante, sino que depende de otros factores tales como la rapidez de corte en el fluido, el esfuerzo cortante y también de la historia previa del fluido.

En estos fluidos la gráfica de τ vs. $\dot{\gamma}$, conocida como la curva de flujo no es una línea recta que pasa por el origen. Del análisis de las curvas de flujo de diversos materiales se puede obtener una clasificación de este tipo de fluidos como sigue:

i) La viscosidad del fluido (η) depende sólo de la rapidez de corte o del esfuerzo cortante. Estos fluidos son independientes del tiempo. Los más conocidos de este grupo son:

Plástico de Bingham

Pseudoplásticos

Dilatantes.

ii) La viscosidad del fluido depende de la historia previa de éste, es decir, si ha estado sometido antes a algún esfuerzo o deformación y de la rapidez de corte. Estos fluidos son dependientes del tiempo. Si los efectos del tiempo son reversibles se clasifican en:

Tixotrópicos

Antitixotrópicos (5).

iii) Fluidos que presentan características de sólidos así como

de líquidos y poseen una recuperación elástica parcial después de una deformación. Estos fluidos reciben el nombre de Viscoelásticos.

ECUACIÓN RELOGICA GENERAL PARA FLUIDOS NO-NEWTONIANOS.

Como vimos en la sección anterior la ecuación reológica para un fluido Newtoniano incompresible es:

$$\tau_{ij} = \mu \Delta_{ij} \quad (T2.4)$$

De manera análoga se ha postulado la ecuación reológica para el fluido No-Newtoniano.

$$\epsilon_{ij} = \eta \Delta_{ij} \quad (T2.5)$$

En la ecuación (T2.5) la viscosidad (η) es una función del esfuerzo cortante o de la rapidez de corte. Como η es un escalar, debe ser sólo una función de otros escalares. En este caso se consideran a los invariantes del tensor de deformación definidos como sigue:

$$I_1 = \sum_i \Delta_{ii} = 2(\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) \quad (T2.6)$$

$$I_2 = \sum_i \sum_j (\Delta_{ij})^2 = \frac{1}{2} (I_1^2 - \Delta_{ij} \Delta_{ji}) \quad (T2.7)$$

$$I_3 = \sum_i \sum_j \sum_k \epsilon_{ijk} \Delta_{ii} \Delta_{jj} \Delta_{kk} = \det \Delta_{ij} \quad (T2.8)$$

Para fluidos incompresibles ($\eta \cdot \delta = 0$), el primer invariante se anula. Para flujo rectilíneo y flujo en dos dimensiones el tercer invariante también se anula. Por lo tanto la viscosidad (η) es una función del segundo invariante del tensor rapidez de deformación, el cual bajo la condición de incompresibilidad se reduce a:

$$I_2 = \frac{1}{2} (\Delta : \Delta)$$

Para obtener las ecuaciones reológicas generales de los diferentes fluidos No-Newtonianos basta con substituir en sus ecuaciones constitutivas los valores de η por $[\frac{1}{2}(\Delta : \Delta)]^{\frac{1}{n}}$ o δ por $[\frac{1}{2}(\delta : \delta)]^{\frac{1}{n}}$ donde $(\delta : \delta) = \frac{2}{3} \frac{\delta \cdot \delta}{(\delta \cdot \delta)^2}$ (I2.9)

FLUIDOS INDEPENDIENTES DEL TIEMPO.

Las curvas de flujo de estos materiales No-Newtonianos son representadas en la figura I.2

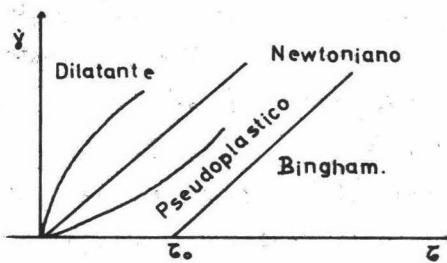


Fig. I.2

MODELO PLÁSTICO DE BINGHAM.

El plástico de Bingham se caracteriza por una curva de flujo que es una línea recta con una intersección, τ_0 , en el eje de los esfuerzos cortantes. El esfuerzo límite, τ_0 , es el esfuerzo que debe ser excedido para que el flujo comience. La ecuación reológica para un plástico de Bingham puede ser escrita como sigue:

$$\tau - \tau_0 = \mu, \gamma ; \tau > \tau_0 \quad (J2.10)$$

donde μ , viscosidad plástica.

La explicación del comportamiento del plástico de Bingham está basada en la consideración de que el fluido en el reposo posee una estructura tridimensional lo suficientemente rígida para soportar cualquier esfuerzo menor que el esfuerzo límite. Si se sobrepasa este esfuerzo la estructura se desintegra completamente y el sistema se comporta como un fluido Newtoniano bajo un esfuerzo cortante $\tau - \tau_0$. Cuando el esfuerzo cortante cae por debajo de τ_0 la estructura vuelve a formarse.

El modelo del plástico de Bingham ideal es importante, puesto que hay muchos fluidos reales que se acercan a este comportamiento. Algunos ejemplos de estos materiales son: pinturas de aceite, pasta de dientes, suspensiones y lodos de perforación.

PSUEDOPLÁSTICOS.

Los fluidos pseudoplásticos no presentan un valor límite de esfuerzo cortante. La curva de flujo típica indica que la razón de esfuerzo cortante a rapidez de corte, que puede ser llamada la viscosidad aparente, disminuye progresivamente al aumentar la rapidez de corte y la curva de flujo se vuelve lineal sólo a muy elevados valores de la rapidez de corte. Este comportamiento es típico de suspensiones de partículas asimétricas o de soluciones de polímero de alto peso molecular. La probable interpretación física de este fenómeno se basa en que al aumentar la rapidez de corte, las partículas asimétricas o las moléculas son alineadas progresivamente. En vez del desorden en que se encuentran cuando el fluido está en reposo, los ejes principales de las moléculas del fluido se alinean en la dirección del flujo. La viscosidad aparente continúa disminuyendo al aumentar la rapidez de corte, hasta que el alineamiento a lo largo de las líneas de flujo alcanza un máximo y la curva de flujo se vuelve lineal. Como los fluidos pseudoplásticos son independientes del tiempo, ésto implica que el alineamiento de las moléculas debe ser instantáneo al aumentar la rapidez de corte y por lo tanto, el efecto del tiempo es despreciable para ser detectado empleando técnicas ordinarias.

El comportamiento peculiar de los fluidos pseudoplásticos

cos está por lo general, restringido a un determinado rango de rapidez de corte. Es debido a ésto que existe un gran número de ecuaciones empíricas que tratan de explicar el comportamiento de estos fluidos en esos rangos.

OSTWALD-DE WAELE-NUTTING (LEY DE LA POTENCIA).

$$\tau = k (\dot{\gamma})^n$$

$$\eta = \dot{\gamma}^{(n-1)} = \tau^{\frac{1}{n}}$$

(T2.11)

donde k : Índice de Consistencia.

n : Índice de Flujo.

De la ecuación (T2.11) se puede observar que son necesarios dos parámetros reológicos para describir el material. Más aún éstos son el número mínimo requerido para su descripción. Para este modelo k es una medida de la viscosidad del fluido y n una medida del carácter No-Newtoniano. Para pseudoplásticos $n < 1$ y mientras más lejana de 1 sea, el fluido será más No-Newtoniano. Es necesario hacer notar que a pesar de que n debe ser prácticamente constante en rangos amplios de rapidez de corte, no es una constante verdadera en todos los rangos posibles de ésta.

Para probar la constancia de n , es conveniente graficar en coordenadas log-log la ley de la potencia que toma la siguiente forma:

$$\log \tau = n \log \dot{\gamma} + \log k \quad (T2.12)$$

Para gráficas los datos dan una linea recta con pendiente n .

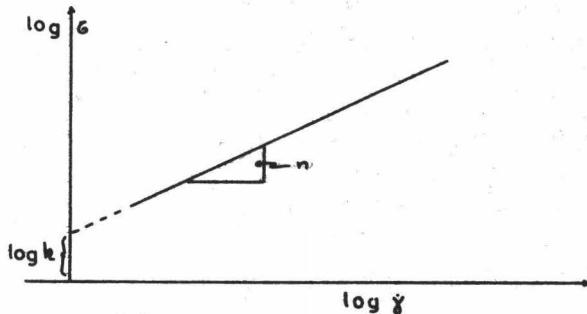


Fig. I.3

El fluido Newtoniano es un caso particular de la ley de la potencia para el cual $n=1$, $\eta=\mu$.

La principal objeción a la ley de la potencia es que no es derivada de ningún concepto físico. Otra objeción es que esta ley no funciona para valores pequeños y grandes de σ y γ .

La ley de la potencia predice para fluidos pseudoplásticos una viscosidad infinita cuando $\gamma(0)$ se acerca a 0, y una viscosidad 0 cuando $\gamma(0)$ tienden a infinito.

REINER-FEILIPPOFF.

$$\sigma = \left[\mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + (\sigma/A)^2} \right] \dot{\gamma} \quad (I2.13)$$

$$\eta = \mu_\infty + \left[\frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + (\sigma/A)^2} \right] \quad (I2.14)$$

Esta ecuación contiene tres parámetros, μ_0 , μ_∞ , A . μ_0 y μ_∞ se refieren a viscosidades Newtonianas cuando el esfuerzo cortante tiende a 0 y a infinito respectivamente. Esta ecuación requiere que η disminuya al aumentar τ por lo tanto, sólo es válida para fluidos pseuoplásticos. Los valores limitantes para la viscosidad y para la pendiente de la gráfica η vs. τ son los siguientes:

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \eta = \mu_0 \quad \lim_{\tau \rightarrow 0} \left(\frac{d\eta}{d\tau} \right) = 0$$

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \eta = \mu_\infty \quad \lim_{\tau \rightarrow \infty} \left(\frac{d\eta}{d\tau} \right) = 0 \quad (I2.15)$$

ELLIS.

$$\dot{\gamma} = \left[\frac{1}{\mu_0} + K \tau^{(n-1)} \right] \tau \quad (I2.16)$$

$$\eta = \frac{\mu_0}{1 + \mu_0 \tau^{(n-1)}} \quad (I2.17)$$

Esta ecuación contiene a la ley de Newton ($n=1$) y a la ley de la potencia ($1/\mu_0 = 0$) como casos particulares. Los valores límite de viscosidad y de la pendiente de la gráfica η vs. τ son:

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \eta = \mu_0 \quad \lim_{\tau \rightarrow 0} \left(\frac{d\eta}{d\tau} \right) = 0$$

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \eta = 0 \quad \lim_{\tau \rightarrow \infty} \left(\frac{d\eta}{d\tau} \right) = 0 \quad (I2.18)$$

BISKO.

$$\tau = (\mu_\infty + \kappa |\dot{\gamma}|^{n-1}) \dot{\gamma} \quad \eta = \mu_\infty + \kappa |\dot{\gamma}|^{n-1} \quad (12.19)$$

Si $n < 1$, este fluido se acercaría más al líquido Newtoniano cuando $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$.

POWELL-EYRING.

$$\eta = \mu_0 \left[\frac{(\tau/\tau_0)}{\operatorname{senh}(\tau/\tau_0)} \right] \quad (12.20)$$

$$\eta = \mu_0 \left[\frac{\operatorname{arc senh}(\mu_0 \dot{\gamma}/\tau_0)}{(\mu_0 \dot{\gamma}/\tau_0)} \right] \quad (12.21)$$

Esta ecuación está basada en la teoría de la rapidez de los procesos químicos, aplicada a los procesos de relajación que se piensa juegan un papel importante en el flujo de fluidos.

Esta ecuación es sólo para pseudoplásticos y sus valores límites son:

$$\lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \eta = \mu_\infty \quad \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \left(\frac{d\eta}{d\dot{\gamma}} \right) = 0 \quad (12.22)$$

$$\lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta = 0 \quad \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \left(\frac{d\eta}{d\dot{\gamma}} \right) = 0$$

DILATANTES.

Estos fluidos se parecen a los pseudoplásticos ya que no presentan un valor límite de esfuerzo cortante. Sin embargo, en

estos fluidos, a medida que la rapidez de corte aumenta, la viscosidad aumenta.

Este comportamiento fué observado en suspensiones con gran concentración de sólidos. Se ha sugerido que cuando estas suspensiones concentradas están en reposo los espacios libres son mínimos y el líquido es sólo suficiente para llenar estos espacios. Cuando estos materiales son deformados a bajos valores de la rapidez de corte, el líquido lubrica el movimiento de una partícula con respecto a otra y por lo tanto, los esfuerzos son menores. A altos valores de la rapidez de corte el estado aglomerado de las partículas se rompe y el material se dilata ligeramente aumentando los espacios libres. El líquido en la nueva estructura es insuficiente para lubrificar el movimiento de las partículas y los esfuerzos aplicados deben ser mayores. La formación de esta estructura causa que la viscosidad aparente aumente rápidamente al aumentar la rapidez de corte.

La ecuación empírica más usada para caracterizar estos fluidos es la ley de la potencia, con valores de $n > 1$.

$$\tau = k(\gamma)^n ; n > 1 \quad (2.11)$$

Para concluir con el tema de los fluidos independientes del tiempo, presentamos una tabla con las ecuaciones empíricas más usuales y su forma reológica general.

TABLA I.

ECUACIONES EXPIRICAS PARA FLUIDOS NO-NEWTONIANOS.

ECUACION	ECUACION PARA EL CASO DE FLUIDO CILINDRICO.	ECUACION RELOGICA GENERAL
LEY DE LA POTENCIA.	$\tau = k (\dot{\gamma})^n$ $\eta = \dot{\gamma}^{(n-1)} = \tau^{\frac{1}{n-1}}$	$\eta = \left[\frac{\Delta : \Delta}{2} \right]^{\frac{n-1}{2}}$
REINER-PHILIPPOFF.	$\tau = [\mu_0 + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + (\dot{\gamma}/\alpha)^2}] \dot{\gamma}$ $\eta = \mu_\infty + \left[\frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + (\dot{\gamma}/\alpha)^2} \right]$	$\eta = \mu_\infty + \left[\frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + ((\dot{\gamma} : \dot{\gamma})/2\alpha)^2} \right]$
ELLIS.	$\dot{\gamma} = [\eta_0 + K \dot{\gamma}^{(n-1)}] \dot{\gamma}$ $\eta = \frac{\mu_0}{1 + \mu_0 \dot{\gamma}^{(n-1)}}$	$\eta = \frac{\mu_0}{1 + \mu_0 (\frac{\dot{\gamma} : \dot{\gamma}}{2})^{\frac{n-1}{2}}}$
SIEKOV.	$\tau = (\mu_\infty + K \dot{\gamma} ^{n-1}) \dot{\gamma}$ $\eta = \mu_\infty + K \dot{\gamma} ^{n-1}$	$\eta = \mu_\infty + K \left[\frac{\Delta : \Delta}{2} \right]^{\frac{n-1}{2}}$
POWELL-EYRING.	$\eta = \mu_0 \left[\frac{(\dot{\gamma}/\beta)}{\operatorname{senh}(\dot{\gamma}/\beta)} \right]$ $\eta = \mu_0 \left[\frac{\operatorname{arc senh}(\dot{\gamma}/\beta)}{(\mu_0 \dot{\gamma}/\beta)} \right]$	$\eta = \mu_0 \left[\frac{(\frac{\dot{\gamma} : \dot{\gamma}}{2\beta})^{\frac{1}{2}}}{\operatorname{senh}(\frac{\dot{\gamma} : \dot{\gamma}}{2\beta})^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{n-1}{2}}$ $\eta = \mu_0 \left[\frac{\operatorname{arc senh}(\mu_0 \frac{\dot{\gamma} : \dot{\gamma}}{2\beta})^{\frac{1}{2}}}{\mu_0 (\frac{\dot{\gamma} : \dot{\gamma}}{2\beta})^{\frac{1}{2}}} \right]$

FLUIDOS DEPENDIENTES DEL TIEMPO.

FLUIDOS TIXOTROPICOS.

Son los fluidos en los cuales la viscosidad disminuye al aumentar la duración de la aplicación del esfuerzo. Este fenómeno ocurre debido a la gradual destrucción de alguna estructura en el fluido, ya sea arreglos moleculares, como en polímeros fundidos o la configuración macroscópica en suspensiones.

La rapidez de rompimiento de la estructura durante una deformación específica, dependerá del número de eslabones susceptibles de ser rotos y por lo tanto, deberá disminuir con el tiempo. Simultáneamente la rapidez de reformación de la estructura aumentará con el tiempo a medida que aumente el número posible de uniones. De esta manera se llega a un equilibrio dinámico cuando la rapidez de destrucción es igual a la de reformación.

La Tixotropía es un proceso reversible y después de un periodo de reposo la estructura del material se regenera gradualmente. Este comportamiento conduce a la aparición de un ciclo de histéresis en la curva de flujo. Este se forma graficando los valores de rapidez de corte, primero cuando aumentan y luego cuando decrecen.

Cualquiera de los fluidos independientes del tiempo e incluso los Newtonianos pueden presentar el fenómeno de la Tixotropía. En la figura I.4 se pueden apreciar las curvas de histéresis

para un material Newtoniano (A) y un material pseudoplástico (B).

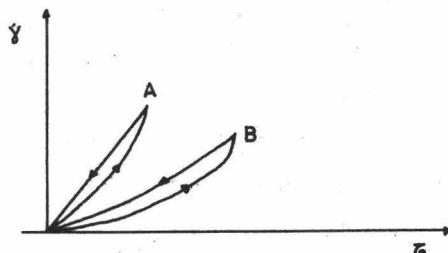


Fig. I.4

FLUIDOS ANTITIXOTROPICOS.

Aquellos fluidos en los cuales la viscosidad aumenta al aumentar la duración de la aplicación del esfuerzo, reciben el nombre de Antitixotrópicos. Este fenómeno es explicado como una formación gradual de la estructura del fluido. Sin embargo, este fenómeno es poco conocido y se limita a valores de rapidez de deformación bastante pequeños. Si se sobrepasan estos valores de rapidez de deformación, la estructura no se forma.

FLUIDOS VISCOELÁSTICOS.

Un material viscoelástico es aquel que posee propiedades elásticas y viscosas a la vez. Se puede decir que es un material viscoso, que presenta elasticidad en su forma.

En esta sección estaremos interesados únicamente en materiales incompresibles, isotrópicos y viscoelásticos.

Por incompresible entendemos que el material se deforma más fácilmente bajo corte que bajo compresión; por lo tanto, la deformación viscoelástica es esencialmente un proceso a volumen constante. El término isotrópico requiere que las propiedades del material en reposo sean las mismas en todas las direcciones. El concepto de viscoelasticidad describa aquellos materiales cuya respuesta a un esfuerzo obedece al principio de superposición, es decir, materiales que pueden ser representados por un modelo formado por elementos que obedezcan la ley de Hooke de elasticidad y elementos que obedezcan la ley de Newton de viscosidad. Las propiedades mecánicas de este material incompresible, isotrópico y viscoelástico están definidas completamente por su respuesta a esfuerzos cortantes homogéneos.

Existen varios métodos para especificar las propiedades de materiales viscoelásticos. Citaremos aquí siete métodos divididos en dos grupos:

Grupo I: Métodos Generales.

A) Modelo de Voigt. Elementos de Voigt conectados en serie.

B) Modelo de Maxwell. Elementos de Maxwell conectados en paralelo.

C) Ecuación en Operadores. ($P_s = 2Q_s$). P y Q son operadores diferenciales.

D) Función Mecánica de Impedancia. $Z(w)$.

Grupo III: Métodos Experimentales.

E) Creep Curve. Consistente en la deformación como función del tiempo a esfuerzo cortante constante.

F) Curva de Relajación. Consistente en el esfuerzo como función del tiempo a deformación constante.

G) Módulo Dinámico. Consistente en el módulo elástico como función de la frecuencia.

En adelante nos ocuparemos de algunos de estos métodos, simplemente con el objeto de ilustrar la complejidad que representa el tratamiento de los fluidos viscoelásticos.

Para profundizar más al respecto, se puede consultar las obras de Mc Kelvey (1), Wilkinson (2), Alfrey (3) y Wohl (4).

MODELO DE VOIGT.

La analogía mecánica de un sólido Hookeano es un resorte y la de un fluido Newtoniano es un dash-pot. Si estos dos elementos son combinados en paralelo tendremos lo que recibe el nombre de sólido de Voigt. (Figura I.5)

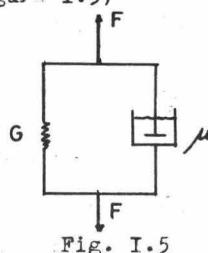


Fig. I.5

La ecuación reológica para el sólido de Voigt es derivada a partir de la suposición de que bajo esfuerzo simple, el esfuerzo total σ en un punto del material donde la deformación es γ la suma de los esfuerzos provenientes de la elasticidad del fluido, σ_e y de la viscosidad del fluido, σ_v . Por lo tanto,

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_v \quad (I2.23)$$

Como la respuesta elástica es Hookeana y la viscosa Newtoniana, tenemos que:

$$\begin{aligned} \sigma_e &= G\gamma \\ \sigma_v &= \mu\dot{\gamma} \end{aligned} \quad (I2.24)$$

Por lo tanto:

$$\sigma = \mu\dot{\gamma} + G\gamma \quad (I2.25)$$

Es la ecuación reológica del sólido de Voigt.

Integrando la ecuación (I2.25) y considerando que el esfuerzo inicial σ_0 es constante y que la deformación inicial es 0, tenemos la siguiente expresión:

$$\gamma(t) = \frac{\sigma_0}{G} [1 - \exp(-t/\alpha)] \quad (I2.26)$$

donde $\alpha = \frac{\mu}{G}$ es el tiempo de retardamiento.

Si el esfuerzo es removido la deformación desaparece exponencialmente con el tiempo, con una constante de tiempo α .

Esto quiere decir que la deformación decrece hasta $1/e$ de su valor inicial en el tiempo α .

Si consideramos la deformación que sufre un sólido de Voigt debido a un esfuerzo como el que se muestra en la figura I.6 obtendremos una gráfica mostrada en la figura I.7

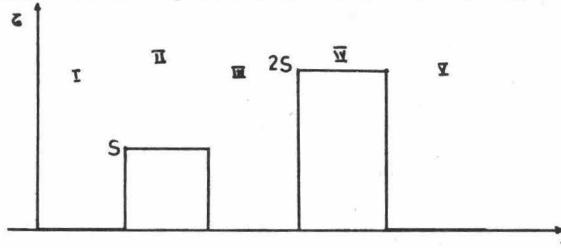


Fig. I.6

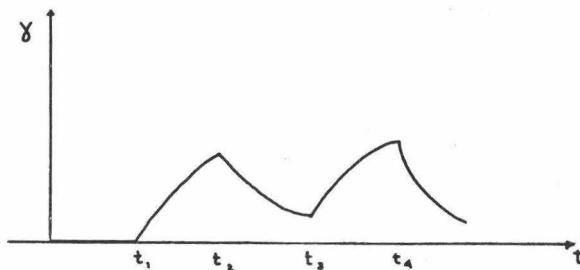


Fig. I.7

En el periodo II cuando se aplica el esfuerzo, el material se deforma. En III el esfuerzo cesa y el material muestra elasticidad retardada. La deformación decrece exponencialmente. Los períodos IV y V son análogos a II y III.

MODELO GENERALIZADO DE VOIGT.

Dado que el modelo de Voigt no es lo suficientemente general para describir el comportamiento de materiales viscoelásticos reales, se ha ideado el modelo generalizado de Voigt, que consiste en sólidos de Voigt conectados en serie. (Figura I.8).

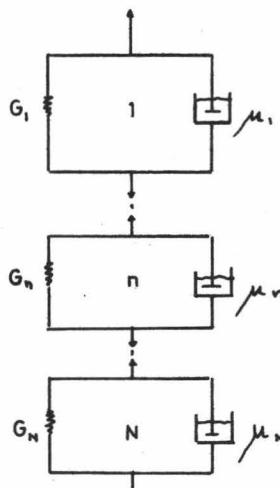


Fig. I.8

Consideremos N sólidos de Voigt en serie. El elemento n -ésimo tendrá un módulo de rigidez G_n , viscosidad μ_n y tiempo de retardamiento α_n . Si aplicamos un esfuerzo τ_0 en el tiempo $t = 0$, para el elemento n -ésimo la deformación será:

$$\gamma_n(t) = \frac{\tau_0}{G_n} \left[1 - \exp(-t/\alpha_n) \right] \quad (I2.27)$$

La deformación total será la suma total de todas las deformaciones, por lo tanto:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sum_{n=1}^N G_n [1 - \exp(-t/\alpha_n)] \quad (I2.28)$$

Si definimos $\frac{G_n}{J_n} = J_n$ como la concordancia de un elemento mecánico tendremos que :

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sum_{n=1}^N J_n [1 - \exp(-t/\alpha_n)] \quad (I2.29)$$

cuando $N \rightarrow \infty$, las constantes de los elementos (J_n, α_n) serán substituidas por la función de distribución $J(\alpha)$ que da la cantidad de concordancia elástica asociada con el tiempo de retardamiento. Esta distribución también es llamada a veces, distribución de tiempos de retardamiento. Si tomamos el límite de la ecuación (I2.29) cuando $N \rightarrow \infty$ obtenremos:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \int_0^\infty J(\alpha) [1 - \exp(-t/\alpha)] d\alpha. \quad (I2.30)$$

La ecuación (I2.30) es de suma importancia ya que nos bastará conocer la función de distribución de concordancia para conocer el comportamiento del material.

El modelo generalizado de Voigt es análogo a un sólido viscoelástico y el sistema no presenta flujo viscoso irrecobrable é ilimitado si G_1, \dots, G_n y μ_1, \dots, μ_n son positivos. Si uno de los sólidos de Voigt tiene un módulo de rigidez 0, únicamente tendremos un dash-pot simple que permitirá el flujo ilimi-

tado y el sistema podría ser considerado como un líquido viscoelástico. De manera similar si uno de los dash-pots tiene viscosidad 0 el modelo tendría concordancia elástica instantánea.

FUNCION CREEP.

La función Creep $\phi(t)$ de un material viscoelástico está definida como la deformación por unidad de esfuerzo, expresada como función del tiempo, cuando el material en reposo es súbitamente sujeto a un esfuerzo constante. Si la deformación $\gamma(t)$ aparece después de que un esfuerzo σ_0 ha sido impuesto en el tiempo $t=0$, la función Creep está dada por:

$$\phi(t) = \gamma(t)/\sigma_0$$

Para el modelo generalizado de Voigt la función Creep es:

$$\phi(t) = \int_0^\infty \gamma(\alpha) [1 - \exp(-t/\alpha)] d\alpha. \quad (I2.31)$$

y la distribución de tiempos de retardamiento puede ser obtenida a partir de una determinación experimental de $\phi(t)$.

MODELO DE MAXWELL.

El fluido de Maxwell consiste en un resorte y un dash-pot conectados en serie. (Figura I.9)

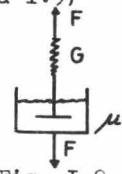


Fig. I.9

Para este modelo, se considera que bajo esfuerzo constante simple, la deformación total γ en un punto del fluido donde el esfuerzo es σ , es la suma de la deformación elástica γ_e y la deformación del flujo γ_f .

$$\gamma = \gamma_e + \gamma_f \quad (I2.32)$$

Diferenciando con respecto al tiempo

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_e + \dot{\gamma}_f \quad (I2.33)$$

Como la respuesta elástica del fluido de Maxwell es Hookeana y la respuesta viscosa es Newtoniana podemos introducir las ecuaciones (I2.34)

$$\sigma = G \gamma$$

$$\sigma = \mu \dot{\gamma} \quad (I2.34)$$

en la expresión (I2.33) para obtener la ecuación reológica del fluido de Maxwell.

$$\sigma = \mu \dot{\gamma} - (\mu/G) \dot{\gamma} \quad (I2.35)$$

donde $\mu/G = \lambda$ se denomina tiempo de relajación.

Integrando la ecuación (I2.35) obtenemos:

$$\sigma(t) = \gamma_0 G \exp(-t/\lambda) \quad (I2.36)$$

El tiempo de relajación λ , representa el tiempo necesario para que el esfuerzo en un fluido de Maxwell decaiga a $1/e$ de su valor inicial si el fluido está sujeto a una deformación

constante. Considerando la deformación que sufre un fluido de Maxwell debido a un esfuerzo constante que se muestra en la figura I.10 tendremos una gráfica que se muestra en la figura I.11.

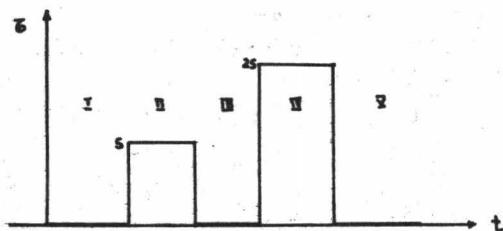


Fig. I.10

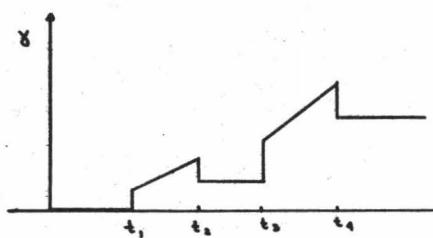


Fig I.11

En el tiempo t_0 , el material sufre una deformación inicial instantánea seguida de flujo. Después de que el esfuerzo ha sido removido en el tiempo t_1 , la deformación de flujo total permanece, pero la deformación elástica es recobrada instantáneamente. Situaciones similares se presentan para t_2 y t_3 .

MODELO GENERALIZADO DE MAXWELL.

El modelo simple de Maxwell no describe enteramente el comportamiento de líquidos viscoelásticos reales, pero puede

ser generalizado de la misma manera que el modelo de Voigt.

Consideremos el arreglo de N elementos de Maxwell en paralelo como se muestra en la figura I.12.

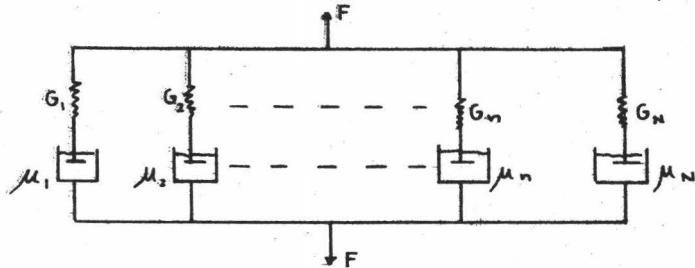


Fig. I.12

Para el n -ésimo elemento el esfuerzo está relacionado con la deformación por la ecuación:

$$\gamma(t) = \sigma_n(t)/\mu_n + \dot{\sigma}_n(t)/G_n \quad (I2.37)$$

El esfuerzo total será la suma de los esfuerzos individuales.

$$\sigma(t) = \sum_{n=1}^N \sigma_n(t) \quad (I2.38)$$

De acuerdo con la ecuación (I2.36) para N elementos:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sum_{n=1}^N G_n \exp(-t/\lambda_n) \quad (I2.39)$$

Tomando el límite cuando $N \rightarrow \infty$ las constantes (σ_n, λ_n) son substituidas por la función de distribución $G(\lambda)$ que dà la cantidad del módulo elástico asociado con el tiempo de relajación.

Esta función recibe el nombre de distribución de tiempos de relajación.

Por lo tanto para $N \rightarrow \infty$.

$$\zeta(t) = \gamma_0 \int_0^{\infty} G(\lambda) \exp(-t/\lambda) d\lambda. \quad (12.40)$$

es la ecuación del modelo generalizado de Maxwell.

Conociendo el valor de la distribución de tiempos de relajación $G(\lambda)$ es posible especificar las propiedades del material viscoelástico. Para conocer el valor de $G(\lambda)$ se emplea la función de relajación.

FUNCION DE RELAJACION.

La función de relajación $\psi(t)$ de un material viscoelástico está definida como el esfuerzo por unidad de deformación inicial como función del tiempo cuando el material ha sido sujeto a una deformación instantánea en el tiempo 0.

$$\psi(t) = \zeta(t)/\gamma$$

Para el modelo generalizado de Maxwell tenemos:

$$\psi(t) = \int_0^{\infty} G(\lambda) \exp(-t/\lambda) d\lambda. \quad (12.41)$$

La distribución de tiempos de relajación puede ser obtenida a partir de datos experimentales de $\psi(t)$.

RELACIONES ENTRE LOS MODELOS DE VOIGT Y MAXWELL.

Ya que hemos profundizado un poco en los modelos de Voigt y Maxwell, es conveniente conocer sus equivalencias.

Si tenemos un modelo de Voigt y queremos construir el Maxwell equivalente, el primer paso consistirá en encontrar la forma estructural correcta del modelo desconocido y segundo calcular los valores numéricos de los parámetros desconocidos. El primer paso puede ser resumido en los siguientes puntos:

- a) El modelo de Maxwell deberá contener el mismo número de resortes y dash-pots que el Voigt equivalente.
- b) Un elemento de Voigt corresponde a un Maxwell doblemente degenerado (un resorte y un dash-pot aislados).
- c) Un elemento de Maxwell corresponde a un Voigt doblemente degenerado.
- d) La regla general involucrada en b) y c) es la siguiente:

La presencia de un elemento aislado de un tipo en un modelo, corresponde a la ausencia de un elemento aislado del tipo opuesto en el modelo conjugado. Es decir, la presencia de un resorte aislado en un Voigt, implica la ausencia de un dash-pot aislado en un Maxwell.

La figura I.13 muestra algunos casos de estas generalizaciones.

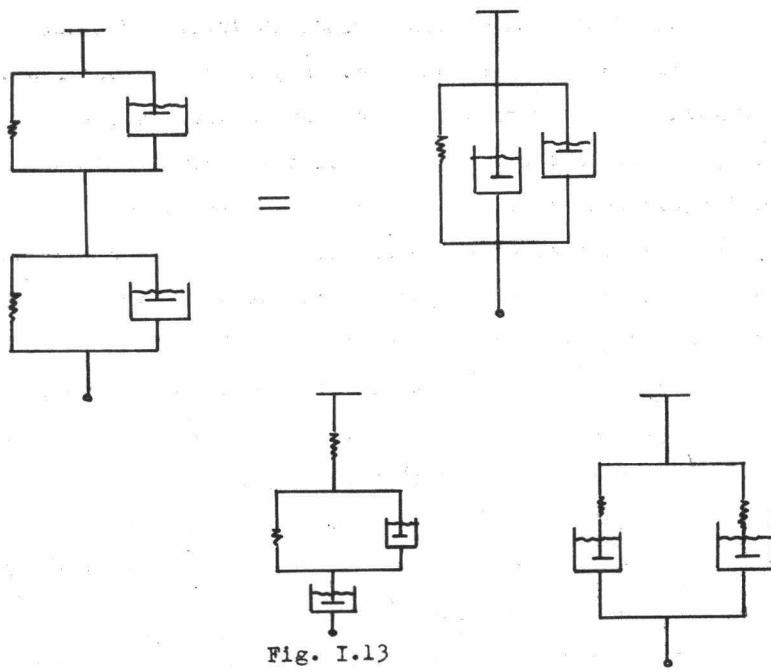


Fig. I.13

CAPITULO II

VISCOSIMETROS.

En el presente capítulo nos referiremos a los diversos tipos de viscosímetros existentes, a las relaciones entre ellos, sus ventajas y desventajas y finalmente la razón por la cual se escogió el viscosímetro capilar para nuestro caso particular.

A) CLASIFICACION DE LOS VISCOSIMETROS. (6).

1) ROTACIONALES

{ Coaxiales
Coaxiales Oscilantes

2) DE DISCO

{ Disco Giratorio
Disco Oscilante

3) ESFERAS CONCENTRICAS

{ Giratorias
Oscilantes

- (4) CONO Y PLATO.
- (5) DOBLE CONO.
- (6) CONICILINDRICOS.
- (7) PLACA OSCILANTE.
- (8) DE CAIDA.
- (9) PLASTOMETRO DE PLACA PARALELA.

- (10) CAPILARES

Cilindro y Pistón	{	}	De vidrio
De orificio			De orificio
De orificio			

De los viscosímetros mencionados en la clasificación anterior hablaremos a continuación de algunos de ellos, por considerarlos los más importantes y utilizados.

VISCOSIMETROS ROTACIONALES.

Estos viscosímetros presentan una propiedad común en su funcionamiento:

Son dispositivos a los cuales se les aplica un torque constante o sea que tienen una velocidad angular constante.

La diferencia entre ellos radica en las distintas geométricas que presentan y que tienen por objeto obtener valores experimentales más precisos. A partir de la medición del torque a diferentes velocidades angulares es posible obtener la curva de flujo. Las relaciones existentes entre el torque, la velocidad angular y el es-

fuerzo, para los diferentes tipos de viscosímetros rotacionales son presentadas en la tabla 1.

Estas relaciones, sin embargo, deben ser corregidas debido a la geometría del aparato. Estas correcciones, conocidas como efectos extremos, varían con respecto al tipo de viscosímetro y su cálculo por lo general involucra matemáticas bastante complejas.

La teoría acerca de estos factores de corrección ha sido desarrollada principalmente por Oka (6), Maron y Krieger (7), Oka y Sato (8).

CILINDROS COAXIALES. (Figura II.1)

En este tipo de viscosímetros se coloca el líquido por caracterizar en el espacio anular comprendido entre dos cilindros coaxiales. Uno de los dos cilindros permanece en reposo mientras que al otro se le aplica un torque constante.

Los principales viscosímetros de este tipo son: Stormer, Haake-Rotovisco y Brookfield Synchroelectric. (Figura III.2).

VISCOSÍMETRO DE DISCO GIRATORIO (Figura II.3).

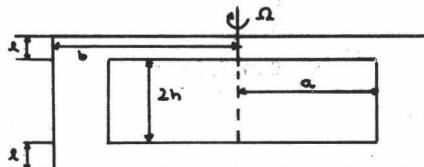


Fig. II.3

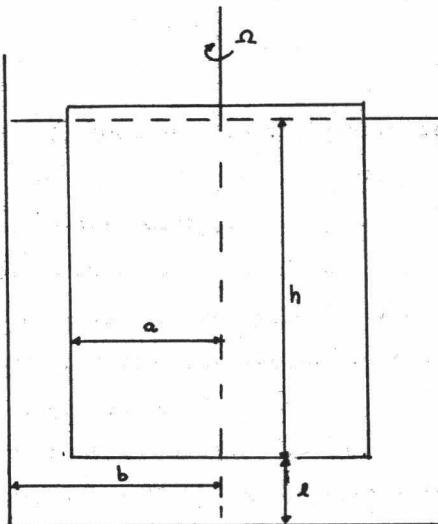


Fig. II.1

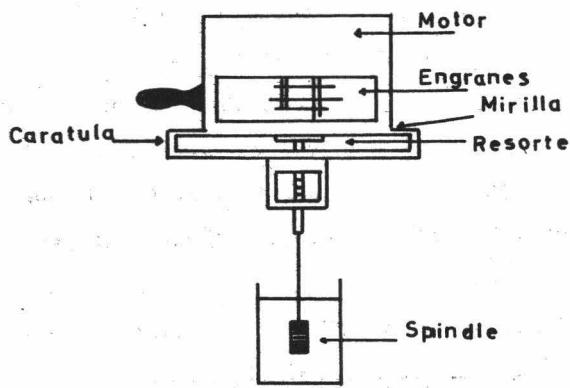


Fig. II.2

Consiste de un disco circular bajo la acción de un torque constante, el cual se sumerge dentro de un fluido y gira con una velocidad angular constante sobre el eje perpendicular al plano del disco. El problema en este viscosímetro radica en la forma de calcular la dependencia del torque y la velocidad angular con la viscosidad. Este tratamiento fué hecho por Oka (6). En su ecuación, Oka toma en cuenta el torque en la parte superior e inferior del disco sin considerar los efectos de los bordes, el torque en la superficie cilíndrica del disco y el torque debido a efectos de extremo superiores e inferiores.

VISCOSIMETROS DE CONO Y PLATO, DOBLE CONO Y CONICILINDRICOS.

CONO Y PLATO.

Este viscosímetro consiste de un cono con un ángulo vertical muy grande colocado sobre un plato horizontal. La generatriz del cono hace un ángulo muy pequeño con el plato (1 o 2°). El espacio entre el cono y el plato se llena del fluido por investigar. En este viscosímetro los efectos extremos son despreciables.

DOBLE CONO.

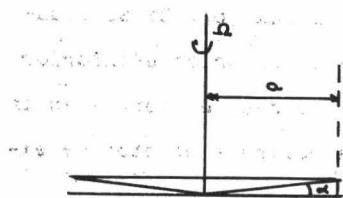
En este dispositivo, el líquido llena el espacio entre dos conos con el mismo eje y vértice. Uno de los conos está en reposo y el otro gira alrededor de su eje.

CONO Y PLATO.

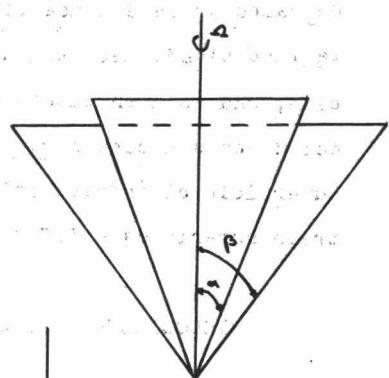
Consiste de un viscosímetro concéntrico con conos coaxiales con vértice común que son las bases del cilindro.

Los tres últimos tipos de viscosímetros se muestran en la

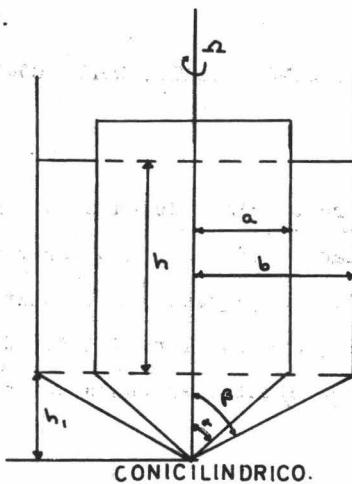
Figura II.4.



CONO Y PLATO.



DOBLE CONO.



CONICILINDRICO.

Fig. II.4.

	CILINDROS COAXIALES.	DISCO GIRATORIO
TIPO MOVIMIENTO.	ROTACION	ROTACION
TORQUE.	$M = 2\pi a^3 h \zeta_a = 2\pi b^3 h \zeta_b$	$M = \frac{16\pi^2 \Delta}{3} \left[\frac{a^2 (a^2 - c^2)^{3/2}}{c (a^2 - c^2)^{3/2}} - a^2 [\pi h] - \sin^{-1} \zeta_b \right]$
VELOCIDAD ANGULAR.	$\Omega = \frac{1}{2} \int_{\zeta_b}^{\zeta_a} f(\zeta) / \zeta \, d\zeta$	
EFFECTO DE EXTREMO.	$M = \frac{4\pi(h+h_0)\gamma\sqrt{2}}{1/a^2 - 1/b^2}$	$M = \frac{\pi a^4 \gamma \sqrt{2}}{2} \left[1 + \frac{4k}{a} \sum_{n=1}^{\infty} a_n I_n \left(\frac{n\pi}{2} \right) \right] + \frac{2}{a^2} \frac{\theta h}{1/a^2 - 1/b^2} + \frac{2k}{\pi a^2} \sum_{n=1}^{\infty} 2n \frac{\sinh knh}{kn}$
VELOCIDAD ANGULAR NEWTONIANO	$\Omega = \frac{1}{4\pi h} \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right) \frac{M}{\gamma}$	
VELOCIDAD ANGULAR LEY DE LA POTENCIA	$\Omega = \frac{\left(\frac{1}{a^{2n}} \right) - \left(\frac{1}{b^{2n}} \right)}{2n (2\pi h)^n} \frac{M^n}{k}$	

VELOCIDADES ROTACIONALES.

TRABAJO

	CONO Y PLATO.	DOBLE CONO.	CONICILINDRICO
TIPO MOVIMIENTO	ROTACION.	ROTACION	ROTACION
TORQUE.	$M = \frac{4\pi a^2 g \Omega}{3} \left[\frac{\sin \alpha}{\cos^2 \alpha} - \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \right]$	$M = \frac{2\pi h^3 g \Omega}{3 \cos^2 \rho} \left(\int_{\alpha}^{\beta} \frac{d\theta}{\sin^2 \theta} \right)^{-1}$	$\frac{M}{\Omega} = \frac{4\pi h g}{\gamma_a^2 - \gamma_b^2} \left(1 + \frac{\Delta h}{h} \right)$
VELOCIDAD ANGULAR.	$\Omega = \rho f(\varepsilon)$		
EFFECTO DE EXTREMO.			$\Delta h = \frac{h_1}{6 \cos^2 \rho} \left(\frac{1}{\gamma_a^2} - \frac{1}{\gamma_b^2} \right) \left(\int_{\alpha}^{\beta} \frac{d\theta}{\sin^2 \theta} \right)^{-1}$
VELOCIDAD ANGULAR NEWTONIANO.	$\Omega \cos \alpha = \frac{3T}{4\pi \mu} \left[\frac{1}{\gamma_a^2} - \cos \alpha \ln \left(\frac{1 + \gamma_a^2 h}{1 + \gamma_b^2 h} \right) \right]$		
VELOCIDAD ANGULAR LEY DE LA POTENCIA.	$\Omega \cos \alpha = \frac{3T}{8\pi \mu} \left\{ \frac{1}{\gamma_a^2} + \frac{3}{2} \left[\frac{1}{\gamma_a^2} - \cos \alpha \ln \left(\frac{1 + \gamma_a^2 h}{1 + \gamma_b^2 h} \right) \right] \right\}$		

VISCOSÍMETROS CAPILARES (Figura II.5).

Este sistema de medición fué uno de los primeros sistemas empleados en la medición de viscosidades. El primer experimento fué debido a Hagen en 1839, cuando se dedicó a estudiar el flujo en capilares para explicar el flujo sanguíneo. Sin embargo, fué Poiseuille quién perfeccionó la teoría de los capilares encontrando la relación entre gasto volumétrico y caída de presión. Este descubrimiento marca el comienzo de la Viscometría Capilar.

En este capítulo únicamente trataremos muy superficialmente el mecanismo y demás características de los viscosímetros capilares. Las ecuaciones que rigen el flujo en este tipo de viscosímetros se estudian con detalle en el Capítulo III.

A) Generalidades:

Este método está basado, en hacer pasar un fluido a través de un tubo de diámetro muy pequeño, para que a partir de mediciones de gasto volumétrico y caídas de presión se pueda obtener la viscosidad.

Generalmente un viscosímetro capilar completo consta de las siguientes partes:

- i) Tanque de almacenamiento del fluido.
- ii) Capilar de dimensiones conocidas.
- iii) Sistema de medición de caídas de presión.
- iv) Sistema de medición de gasto volumétrico.
- v) Unidad para controlar la temperatura.

Existen varios tipos de viscosímetros capilares:

1) Viscosímetro de cilindro y pistón.

Consta de un cilindro en donde está contenido el fluido. El fluido se desplaza por un pistón que puede accionarse por medio de:

- i) Peso muerto.
- ii) Sistema neumático (presión suministrada por nitrógeno).
- iii) Sistema mecánico.
- iv) Sistema hidráulico.

Este tipo de viscosímetros se emplea bastante para medir propiedades de fluidos viscosos No-Newtonianos con viscosidad hasta de 10^6 poise, a niveles de esfuerzo cortante de 2×10^6 dinas/cm².

Una variedad del viscosímetro capilar de cilindro y pistón es aquella en la cual se elimina el pistón y el fluido es obligado a desplazarse aplicándole una presión. Esta modificación ha sido perfeccionada por Dodge (9).

Como se verá más adelante, este tipo de viscosímetro capilar es el que se ha empleado para el desarrollo experimental de esta tesis. (Figura II.6).

2) Capilar de vidrio. (Ostwald).

Este es un viscosímetro usado principalmente para fluidos Newtonianos. Consiste en un bulbo superior de donde la muestra fluye a un bulbo inferior por gravedad. Midiendo el tiempo que tar-

da el fluido en pasar de un bulbo al otro puede calcularse la viscosidad cinemática.

3) De orificio.

El fundamento teórico de este dispositivo fué derivado de la ley de Hagen-Poiseuille, que dice, que el tiempo que tarda un cierto volumen de fluido en pasar a través de un capilar es proporcional a la viscosidad del fluido.

Debido a la pequeña distancia que recorre el fluido en estos capilares, la ley de Hagen-Poiseuille sufre grandes desviaciones. Entre los factores que la afectan, podemos citar los siguientes:

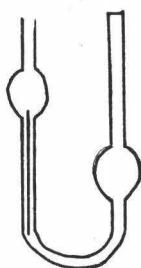
- i) La cabeza hidrostática se consume prácticamente a la entrada del orificio.
- ii) Las pérdidas por fricción son función del área transversal, velocidad del fluido, forma del orificio de entrada y propiedades del fluido.

A pesar de estos inconvenientes este aparato se emplea ampliamente en la industria debido a su facilidad de operación y bajo costo. Algunas marcas comerciales de este tipo de viscosímetros son: Saybolt Universal, Furol, Redwood, Engler y Barbey.

ERRORES QUE SE PUEDEN PRESENTAR EN LAS MEDICIONES EN UN VISCOSIMETRO CAPILAR.

Los errores propios de un viscosímetro capilar afectan de

diferente manera a una determinada curva de flujo. Estas desviaciones se encuentran representadas en la siguiente gráfica (Fig. II.7)



OSTWALD.

Fig. II.5

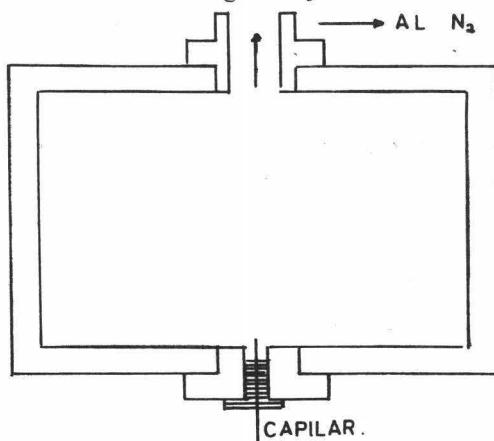


Fig. II.6

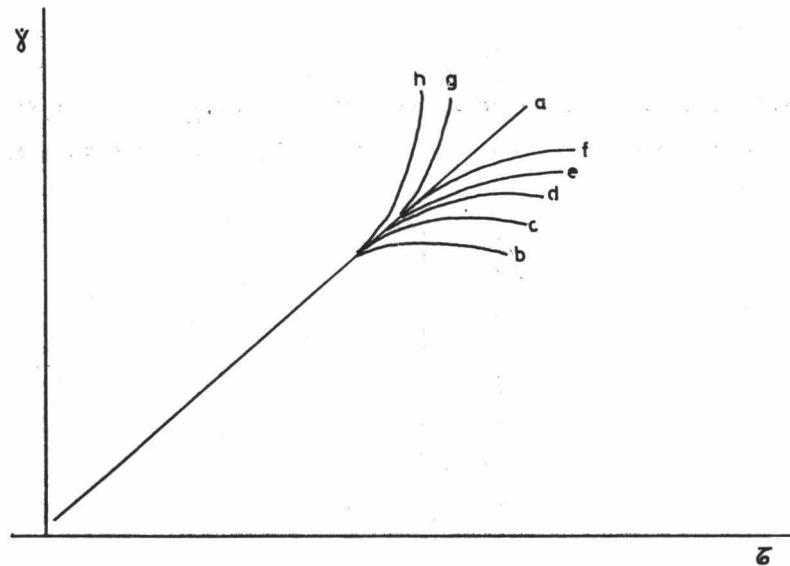


Fig. II.7

Los diferentes efectos en el viscosímetro capilar pueden resumirse en la tabla II.2

Los efectos de extremos y las pérdidas por energía cinética serán tratados ampliamente en el Capítulo III dado que forman la parte molecular de este trabajo.

Para mayor información sobre viscosímetros se puede consultar la obra de Van Wazer (10).

TABLA II.2

EFFECTOS EN EL VISCOSEMETRO CAPILAR.

	EFFECTO	CAUSA
b	PERDIDAS POR ENERGIA CINETICA.	Pérdida de presión efectiva debido a la Energía Cinética de la corriente.
c	EFFECTOS DE EXTREMO.	Pérdidas de Energía debido a comportamiento viscoso o elástico cuando un fluido converge o diverge en el fin de un capilar.
d	ENERGIA ELÁSTICA.	Pérdidas de Energía debidas a deformación elástica del fluido, no recobradas durante el flujo en el capilar.
e	TURBULÉNCIA.	Alejamiento del flujo laminar.
f	PERDIDAS DE PRESIÓN ANTES DEL CAPILAR.	Energía disipada por el flujo del material dentro del cilindro antes de entrar al capilar.
g	EFFECTOS TÉRMICOS.	Conversión de Energía de presión en Energía térmica durante el flujo.
h	EFFECTOS DE LA PARED.	Fenómenos de superficie en la interfase pared - fluido.

COMPARACION DE METODOS EXPERIMENTALES Y VARIABLES QUE
SE MIDEN.

Esta comparación la estableceremos entre los viscosímetros rotacionales y los capilares con el objeto de presentar las ventajas y desventajas de unos y otros, comparar las variables que se miden, sus rangos de operación, para que tipos de fluidos son más convenientes, etc.

En los viscosímetros rotacionales las variables que se miden son por lo general el torque y la velocidad angular, mientras que en los capilares generalmente es el gasto volumétrico y la caída de presión.

En los rotacionales el fluido está sujeto a una rapidez de corte constante lo que permite la medición del esfuerzo cortante. Esto facilita la construcción de la curva de flujo y por ende el cálculo de la viscosidad. Además una de las ventajas que presentan estos viscosímetros es la continuidad de sus lecturas. Para unas condiciones frontera establecidas, las lecturas pueden ser extendidas para períodos largos de tiempo, lo cual permite el análisis cuantitativo de fluidos dependientes del tiempo.

Sin embargo, estos viscosímetros presentan algunas desventajas en relación a los viscosímetros capilares. Primeramente, su construcción es más compleja. Dado que las variables por medir son torque y velocidad angular, ésto implica que su costo sea mayor. Deben estar siempre perfectamente calibrados y en sitios ale-

jados de cualquier vibración. Desde el punto de vista analítico los cálculos que se deben hacer para conocer la viscosidad de un fluido pueden ser bastante pesados cuando se hacen las correcciones por efectos de extremo (6).

En los viscosímetros capilares la curva de flujo puede obtenerse a partir de los datos de gasto volumétrico y caída de presión. Estos aparatos son útiles ya que los datos obtenidos de ellos pueden aplicarse en la resolución de problemas de flujo en tuberías. Además, pueden abarcar un rango mayor de rapidez de corriente y esfuerzo cortante. Los aparatos complementarios como son los dispositivos de control de presión y temperatura no son tan delicados como los dispositivos de los viscosímetros rotacionales.

Las desventajas que pueden presentar los viscosímetros capilares radican en la posible inexactitud de medición y en la gran cantidad de cálculos necesarios para conocer la curva de flujo y la viscosidad.

Una vez citadas ventajas y desventajas de estos viscosímetros, estamos en posición de aducir las razones por las cuales hemos escogido el viscosímetro capilar, las que se citan a continuación:

- a) Construcción sencilla.
- b) Bajo costo.
- c) Operación simple.
- d) Rango de operación más amplio.
- e) Datos útiles para ser usados en problemas de flujo en tuberías.

f) Cálculos sencillos aunque numerosos.

Por último y quizás la razón de más peso

g) Carencia de un aparato de este tipo en el Laboratorio
de Ingeniería Química de la Facultad de Química.

CAPITULO III

FLUJO DE POISEUILLE. (VISCOSIMETRO CAPILAR).

Consideremos el flujo de un líquido incompresible a través de un conducto circular, de radio R y longitud L , como se muestra en la Figura III.1

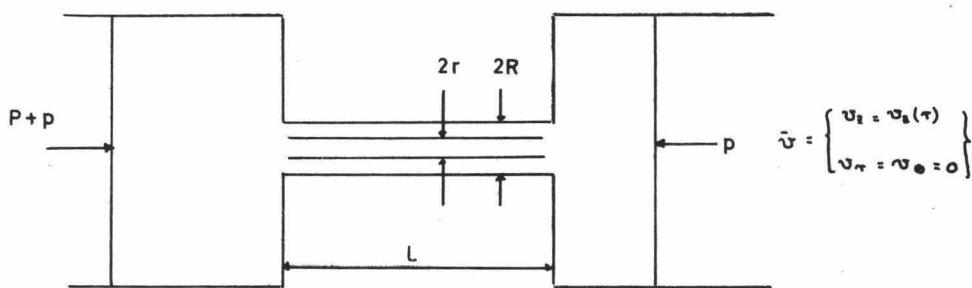


Fig. III.1

Al final del tubo encontramos dos tanques, que tienen dos pistones que están ejerciendo presiones de $P+p$ y P respectivamente. P será la cabeza hidrostática y p la presión atmosférica. Los tanques y el tubo forman una estructura rígida sin movimiento. El fluido que pasa por el tubo está gobernado por la ecuación (III.1) (11).

$$\dot{y} = f(\zeta)$$

(III.1)

Esta ecuación recibe el nombre de curva de flujo y puede ser determinada a partir de mediciones de caída de presión y gasto volumétrico.

Previo a iniciar el desarrollo matemático debemos tener en cuenta las siguientes suposiciones con respecto al movimiento del líquido (11):

- i) Fluido incompresible (densidad constante).
- ii) Flujo laminar.
- iii) Líneas de corriente paralelas al eje del tubo. El fluido se telescopía.
- iv) Régimen permanente.
- v) No hay slip en la pared.

El flujo que cumple con estas suposiciones recibe el nombre de Flujo de Poiseuille.

Consideremos la superficie cilíndrica en el fluido de radio r y longitud L . Teniendo en cuenta la suposición iv) el sistema de fuerzas que actúa sobre el fluido debe estar en equilibrio.

Fuerza que se opone al flujo = Fuerza que hace fluir .

$$2\pi r L \tau = \pi r^2 P \quad (\text{III.2})$$

A partir de la ecuación (III.2) obtenemos la ecuación (III.3a) y (III.3b). Esta última está evaluada en la pared del

tubo ($r = R$).

$$\zeta = \frac{P \tau}{2 L} \quad (\text{III.3a})$$

$$\zeta \omega = \frac{P R}{2 L} \quad (\text{III.3b})$$

De acuerdo con la suposición iii)

$$\dot{V} = - \frac{d v(r)}{d r} \quad (\text{III.4})$$

Por otro lado el gasto volumétrico está dado por:

$$Q = \int_0^R \int_0^{\pi} \tau v(\tau) d\theta dr$$

$$Q = \int_0^R 2\pi \tau v(\tau) dr$$

Integrando por partes

$$Q = \left[\pi \tau^2 v(\tau) \right]_0^R - \int_0^R \pi \tau^2 \left(\frac{dv}{d\tau} \right) dr$$

$$\text{Para } \tau = R \quad v(\tau) = 0 \quad \therefore [\pi \tau^2 v(\tau)] = 0 \\ \tau = 0 \quad [\pi \tau^2 v(\tau)] = 0$$

$$\therefore Q = - \int_0^R \pi \tau^2 \left(\frac{dv}{d\tau} \right) dr = \int_0^R \pi \tau^2 f(\tau) dr \quad (\text{III.5})$$

De la ecuación (III.3a)

$$d\tau = \frac{2L}{P} d\zeta ; \quad \tau^2 = \left(\frac{2L}{P} \right)^2 \zeta^2$$

Sustituyendo en (III.5)

$$Q = \int_0^R \pi \left(\frac{2L}{P} \right)^2 \zeta^2 f(\zeta) \frac{2L}{P} d\zeta$$

$$Q = \frac{8\pi L^2}{P^3} \int_0^{\zeta \omega} \zeta^2 f(\zeta) d\zeta \quad (\text{A})$$

Multipliando por 4 y dividiendo entre R^3 la expresión (a)

$$\frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{32 \pi L^3}{R^3 \tau^3} \int_0^{\tau \omega} \tau^2 f(\tau) d\tau \quad ; \quad \tau \omega = \frac{P_R}{2L}$$

$$\frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{4}{\tau \omega^3} \int_0^{\tau \omega} \tau^2 f(\tau) d\tau = f(\tau \omega) \quad (\text{III.6})$$

en donde $\frac{4Q}{\pi R^3}$ representa la rapidez de corte para fluidos Newtonianos.

Diferenciando la ecuación (III.6) obtendremos la ecuación de Rabinowitsch-Mooney-Weissenberg (12), que es la que nos relaciona la rapidez de corte para fluidos No-Newtonianos con la rapidez de corte y el esfuerzo cortante para Newtonianos.

$$f(\tau \omega) = \frac{3}{4} f(\tau \omega) + \frac{1}{4} \tau \omega \left(\frac{df(\tau \omega)}{d\tau \omega} \right)$$

$$f(\tau \omega) = \frac{3}{4} \dot{\gamma} + \frac{1}{4} \tau \omega \left(\frac{d\dot{\gamma}}{d\tau \omega} \right) \quad (\text{III.7})$$

Esta ecuación es absolutamente general y a partir de ella se pueden obtener otras expresiones particulares para una determinada curva de flujo. El desarrollo completo de la ecuación de Rabinowitsch se encuentra en el artículo original (12).

Fluido Newtoniano.

Para el fluido Newtoniano la curva de flujo está dada por:

$$f(\tau) = \tau/\eta$$

$$f(\tau \omega) = \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{4}{\tau \omega^3} \int_0^{\tau \omega} \tau^2 f(\tau) d\tau$$

Sustituyendo la ecuación de la curva de flujo en la expresión anterior

$$f(\zeta_w) = \frac{4}{\zeta_w^3} \int_0^{\zeta_w} \frac{\zeta^3}{\gamma} d\zeta$$

$$f(\zeta_w) = \zeta_w / \gamma ; \quad f(\zeta_w) = \frac{4Q}{\pi R^3}$$

$$\gamma = \frac{\rho R^4 \pi}{8 L Q} \quad (\text{III.8})$$

Este último resultado corresponde a la ecuación de Hagen-Poiseuille.

Fluido que obedece la ley de la potencia.

La curva de flujo es:

$$f(\zeta) = (\gamma \zeta)^n$$

$$f(\zeta_w) = \frac{4}{\zeta_w^3} \int_0^{\zeta_w} \zeta^2 f(\zeta) d\zeta$$

$$f(\zeta_w) = \frac{4}{\zeta_w^3} \int_0^{\zeta_w} \zeta^2 (\gamma \zeta)^n d\zeta$$

$$f(\zeta_w) = \frac{4 \zeta_w^n}{(3+n)\gamma} \quad f(\zeta_w) = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad \zeta_w = \frac{\rho R}{2L}$$

$$\gamma = \frac{\pi R^3}{(3+n)Q} \left(\frac{\rho R}{2L} \right)^n \quad (\text{III.9})$$

EFFECTOS EN LAS FRONTERAS LÍMITE.

Consideremos el sistema representado en la figura III.2. En ella, encontraremos diferentes regiones que nos serán de utilidad para conocer realmente algunos efectos que intervienen en el llamado flujo de Poiseuille.

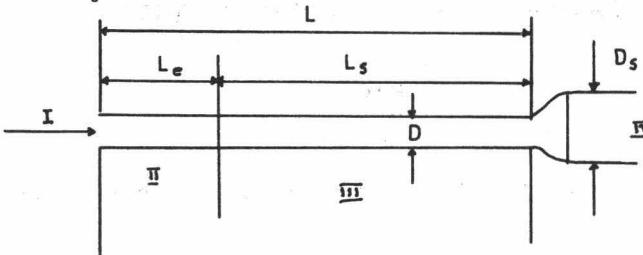


Fig. III.2

La región III la hemos designado como la región de flujo totalmente desarrollada. En esta zona el perfil de velocidad está desarrollado y tanto la rapidez de corte $\dot{\gamma}$ como el esfuerzo cortante τ dependen sólo de la coordenada radial. El desarrollo del perfil de velocidades ocurre en la región II, o sea la región de entrada. Aquí $\dot{\gamma}$ y τ dependen de la coordenada radial así como de la coordenada medida a lo largo del eje del tubo. En la región de salida IV, la influencia restrictiva de las paredes del tubo desaparecen y un segundo arreglo del perfil de velocidades se presenta.

Todos los efectos mencionados anteriormente ejercen una cierta influencia sobre los datos que se pueden obtener de un vis-

cosímetro capilar, por lo tanto, debemos ilustrar cual es la manera de efectuar correcciones que tomen en consideración a las mismas.

CORRECION POR LOS EFECTOS DE ENTRADA (BAGLEY) (13).

En la región de entrada, las partículas de fluido entran al tubo provenientes del tanque siendo aceleradas para obtener sus velocidades finales correspondientes al flujo desarrollado. La energía consumida en este proceso causa que la presión caiga más rápidamente en esta sección que en la región de flujo desarrollado. Como se muestra en la figura III.3, el gradiente de presión baja a lo largo de la longitud de la región de entrada y llega a alcanzar un valor constante que se mantiene a lo largo de la región de flujo desarrollado. Con el objeto de poder tomar como medida la caída de presión en todo el sistema, Bagley ideó una corrección que es semejante al concepto de longitudes equivalentes en cálculo de tuberías.

El aumentar la longitud trae como consecuencia que podemos conocer el verdadero valor del esfuerzo cortante en la pared.

Por lo tanto, la corrección de Bagley, es en esencia una corrección al esfuerzo cortante.

En forma de ecuación la corrección de Bagley es:

$$L = L + nD \quad (\text{III2.1})$$

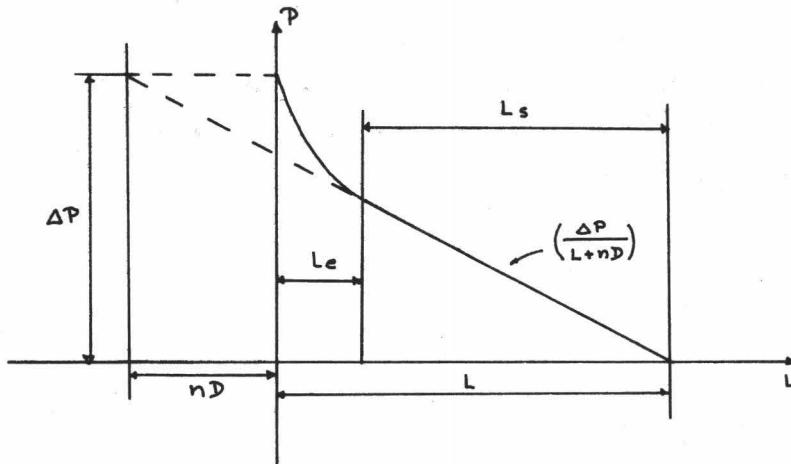


Fig. III.3

CORRECION POR ENERGIA CINETICA.

Cuando el líquido que se movía lentamente en el tanque, se encuentra en el capilar, debe de moverse mucho más rápido haciendo que la presión caiga. La diferencia efectiva de presiones es realmente menor que la medida experimentalmente. Para corregir este efecto asumimos que este comportamiento lo podemos expresar como:

$$P_{ef} = P_T - m \rho \bar{v}^2 \quad (III2.2)$$

donde ρ = densidad del fluido.

\bar{v} = velocidad promedio.

m = factor.

Fluidos Newtonianos.

La ecuación de Hagen-Poiseuille debe ser corregida por efectos de entrada y energía cinética.

La corrección por efectos de entrada (algunas veces llamada Corrección de Couette) toma varios valores:

Rayleigh: $n = 0.824$

Scheader: $n = 0.805$

Bond : $n = 0.566$

La corrección por energía cinética (a veces llamada de Hagenbach) toma valores de $m: \{0.5-1.55\}$. Por lo general se considera $m = 1.12$, puesto que este valor corresponde a un flujo desarrollado. Tomando en cuenta estas consideraciones la ecuación de Hagen-Poiseuille queda como:

$$\eta = \frac{\pi R^4 P}{8Q(L+nR)} - \frac{m \rho Q}{8\pi(L+nR)} \quad (\text{III2.3})$$

Para mayor información acerca del cálculo de m y n se puede consultar el artículo de Swindells (14).

FLUIDOS NO-NEWTONIANOS.

Las correcciones para fluidos No-Newtonianos son básicamente las mismas que para Newtonianos, con la salvedad de que tendremos que corregir también la rapidez de corte a partir de la ecuación de Rabinowitsch.

Para obtener la corrección de Bagley, el procedimiento a seguir es el siguiente:

a) Para un capilar con una cierta relación de L/D es medida la caída de presión y el gasto.

b) Por medio de la fórmula $\dot{y} = \frac{4Q}{\pi R^3}$ se encuentran diferentes valores de \dot{y} . Se grafica $\Delta P^* \text{ vs. } \dot{y}$ teniendo como parámetro diferentes valores de L/D .

c) A partir de la gráfica de $\Delta P^* \text{ vs. } \dot{y}$, se grafica a ora $\Delta P^* \text{ vs. } (L/D)$ a diferentes valores de la rapidez de cor-

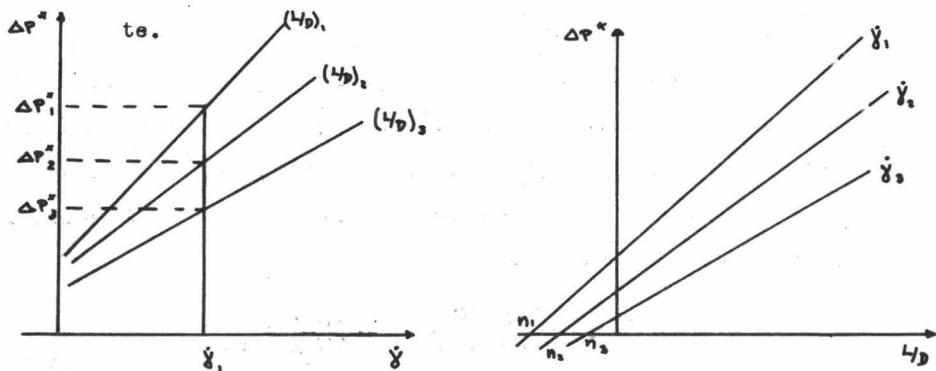


Fig. III.4

De acuerdo a la expresión de Bagley:

$$\mathcal{G} \omega = \frac{\Delta P^* R}{2(L+nR)} = \frac{\Delta P^*}{4(L/D+n)} \quad (\text{III2.4})$$

Si hacemos que $\Delta P^* \rightarrow 0$ y que \mathcal{G} tome un valor constante $\mathcal{G} \omega$ podemos decir que

$$n = -L/D$$

o a partir de la gráfica de $\Delta P^* \text{ vs. } (L/D)$ la intersección de las rectas de \dot{y} constante con el eje de L/D , nos dará el valor de n .

d) La corrección por energía cinética se determina de la siguiente manera: A partir de datos de ΔP y Q obtenemos la velocidad promedio.

$$\bar{v} = \frac{Q}{\pi R^2} \quad (\text{III2.5})$$

$$\text{Energía cinética} = m \rho \bar{v}^2$$

$m = 1.12$ (distribución de velocidad parabólica).

Por lo tanto

$$\Delta P^* = \Delta P - m \rho \bar{v}^2 \quad (\text{III2.2})$$

Esta ΔP^* es la que se debe usar en las gráficas de Bagley para obtener n .

Resumiendo, el procedimiento a seguir para obtener valores correctos de viscosidades de fluidos No-Newtonianos (no elásticos) a partir de un viscosímetro capilar es el siguiente: (15)

- 1) Corrección por energía cinética.
- 2) Obtención de las gráficas de Bagley para determinar n .
- 3) Corrección del esfuerzo cortante.

$$\zeta \omega = \frac{\Delta P^*}{4(L/D + n)}$$

- 4) Graficar $\dot{\gamma}$ vs. $\zeta \omega$ para obtener $\frac{d\dot{\gamma}}{d\zeta \omega}$.

- 5) Usando la ecuación de Rabinowitsch calcular $f(\zeta \omega)$.

$$f(\zeta \omega) = \frac{3}{4} \dot{\gamma} + \frac{1}{4} \zeta \omega \cdot \frac{d\dot{\gamma}}{d\zeta \omega}$$

6) Calcular la viscosidad a partir de:

$$\eta = \frac{\tau_\omega}{f(\tau_\omega)}$$

Otro método alternativo, aunque similar para la corrección por efectos de entrada ha sido propuesto por Brodkey y Metzger (16).

Consiste en partir de la ecuación

$$\tau_\omega = \frac{1}{4} \frac{d \Delta p^*}{d \gamma_D} \quad (\text{III2.6})$$

De esta ecuación se observa que el esfuerzo cortante en la pared puede ser obtenido de la pendiente de la gráfica de $\Delta p^* \sim \gamma_D$ sin necesidad de determinar la corrección n .

Para obtener la rapidez de corte corregida haremos uso de la ecuación modificada de Rabinowitsch (16).

$$f(\tau_\omega) = \left(\frac{3n' + 1}{4n'} \right) \dot{\gamma} \quad (\text{III2.7})$$

El valor de n' está dado por la ecuación

$$n' = \frac{d \log \tau_\omega}{d \dot{\gamma}} \quad (\text{III2.8})$$

donde n' puede ser obtenida de la pendiente de la gráfica logarítmica de $\tau_\omega \sim \dot{\gamma}$. Para obtener el valor de la viscosidad bastará con obtener el cociente entre el esfuerzo cortante corregido y la rapidez de corte corregida.

De acuerdo a lo anterior, la metodología a seguir es:

- 1) Los valores de rapidez de corte calculados se grafican contra la presión corregida para cada capilar. ($\Delta P^* \approx \gamma$)
- 2) A valores arbitrarios de la rapidez de corte se obtienen las presiones correspondientes que son graficadas contra los diferentes valores de L/D . ($\Delta P^* \approx L/D$)
- 3) Las pendientes de estas líneas son usadas para corregir el esfuerzo cortante en un capilar de longitud infinita.

$$\bar{\epsilon}_w = \frac{1}{4} \frac{d \Delta P^*}{d L/D}$$

- 4) De la pendiente de una gráfica logarítmica de esfuerzo cortante corregido contra rapidez de corte se obtienen las n' y la rapidez de corte es corregida con la ecuación (III2.7)

$$f(\bar{\epsilon}_w) = \left(\frac{3n' + 1}{4n'} \right) \gamma$$

$$n' = \frac{d \log \bar{\epsilon}_w}{d \gamma}$$

- 5) Por medio del cociente entre el esfuerzo cortante corregido y la rapidez de corte corregida se obtiene la viscosidad.

$$\eta = \frac{\bar{\epsilon}_w}{f(\bar{\epsilon}_w)}$$

FLUIDOS VISCOELASTICOS.

Hasta ahora nos habíamos referido exclusivamente a la información que se puede obtener de un viscosímetro capilar en lo que respecta al cálculo de viscosidades, tanto Newtonianas como No-Newtonianas.

El viscosímetro capilar, además, nos puede dar información elástica acerca del fluido que estamos investigando.

Antes de entrar realmente a estudiar la manera de obtener información elástica a partir de datos del viscosímetro capilar, es necesario tratar un aspecto interesante del flujo de materiales viscoelásticos en capilares. Nos referimos al fenómeno de Engrosamiento, considerado dentro del grupo de efectos en las fronteras límite.

Efecto de Engrosamiento.

Consiste básicamente en un ensanchamiento de la corriente a la salida del capilar. Este fenómeno se basa en el hecho de que durante el paso del fluido por el capilar éste sufre una deformación elástica recobrable. La recuperación de esta deformación elástica a la salida del capilar, es la responsable del engrosamiento de la corriente.

La figura III.5 muestra la deformación que sufre un elemento de un fluido. Antes de iniciar la deformación, el elemento tiene un espesor dr y el ángulo α es 0. Cuando el elemento es deformado, el ángulo α crece y el espesor del elemento pasa a ser

dr' . La recuperación de la deformación hace que α vuelva a ser 0 pero el espesor del elemento de fluido permanece como dr' .

El estado de deformación es caracterizado por el ángulo α y la distancia dr . Cuando cesa la fuerza deformante $\alpha \rightarrow 0$ y $dr \rightarrow dr'$.

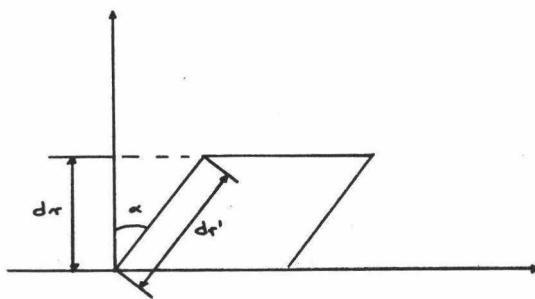


Fig. III.5

Para efectuar los cálculos en forma cuantitativa, deberemos conocer, el modelo reológico que nos relacione el esfuerzo cortante con la deformación y además la expresión que nos proporcione el engrosamiento neto como una función de la deformación.

El modelo reológico más simple que nos puede representar el fenómeno de elasticidad retardada recobrable, es el modelo de Voigt.

$$y(x) = \frac{\tau}{G} [1 - e^{-t/\lambda}] \quad (\text{III3.1})$$

Además debemos tener la expresión para el engrosamiento neto, que es el engrosamiento total menos la reducción de diámetro debido al rearrreglo del perfil de velocidad a la salida. Esta expresión para un fluido que obedece la ley de la potencia es (1):

$$\beta = \sqrt{\frac{2n+1}{3n+1}} - 1 + \int_0^1 \sqrt{1+y^2} dx \quad (\text{III}3.2)$$

donde $x = r/R$.

Para este tipo de fluido se puede considerar el esfuerzo cortante promedio como

$$\bar{\tau} = \frac{\Delta P R}{2L}$$

y al tiempo de residencia promedio como:

$$t = 2 \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{3n+1}{n} \right) \left(\frac{1}{2} \bar{\tau} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (\text{III}3.3)$$

Combinando estas ecuaciones podemos ver que el engrosamiento β es sólo función de la ΔP . Además

$$\lim_{\Delta P \rightarrow 0} \beta = \lim_{\Delta P \rightarrow \infty} \beta = \sqrt{\frac{2n+1}{3n+1}} \quad (\text{III}3.4)$$

Esto nos indica que la curva de $\beta \sim \Delta P$ pasa por un máximo. Este aparece debido a que el modelo reológico toma en cuenta elasticidad retardada. Dado un suficiente tiempo, la deformación en el fluido aumentaría directamente proporcional a la presión (esfuerzo) hasta alcanzar un valor máximo. Sin embargo, al aumentar la presión el tiempo de aplicación del esfuerzo baja y la deformación se ve desplazada de su posición de equilibrio. Este engrosamiento, en

ciertos casos ha llegado a medir hasta un 44% del grosor de la corriente normal.

Una excelente referencia son los artículos de Mc Intosh (17) donde este problema se trata ampliamente.

CORRECCION POR ENERGIA ELASTICA. (15).

Los fluidos viscoelásticos al fluir poseen una determinada cantidad de energía elástica.

Una medida de esta energía, por unidad de volumen, es el producto del esfuerzo cortante τ y el esfuerzo recobrable S , también llamado esfuerzo normal τ_{12} , que es constante para una rapidez de corte determinada.

$$\tau_{12} = \tau_{12} S \quad (\text{III3.5})$$

Este esfuerzo normal actúa como una tensión sobre el fluido en la dirección de flujo. En el caso del capilar, la energía elástica le es dada al fluido en la entrada y es transportada por el mismo. La energía elástica así adquirida es disipada de una manera similar a la energía cinética.

Un balance de energía en el capilar sería:

$$P_T Q = P_c Q + m \rho \bar{v}^2 Q + E \quad (\text{III3.6})$$

$$P_T = P_c + m \rho \bar{v}^2 + E/Q \quad (\text{III3.7})$$

donde E/Q = energía elástica promedio esfuerzo normal σ_{11} .

Si P_c es constante a lo largo del capilar y denotando al esfuerzo normal en la salida del capilar como $(\sigma_{11})_w$ se tiene:

$$P_T = P_c + m \rho \bar{v}^2 + (\sigma_{11})_w \quad (III.8)$$

Los términos de esta ecuación deben ser modificados de acuerdo a:

Corrección por efectos de entrada

$$P_c = \frac{2(L+nR)}{R} \sigma_{cw} \quad (III.9)$$

donde σ_{cw} = esfuerzo en la pared del capilar.

De igual manera podemos calcular el esfuerzo cortante total:

$$P_T = \left(\frac{2L}{R}\right) \sigma_T \quad (III.10)$$

Además, considerando el esfuerzo recobrable en la pared del capilar como s_w :

$$(\sigma_{11})_w = (\sigma_{cw}) s_w \quad (III.11)$$

En consecuencia, sustituyendo (III.9) y (III.11) en la ecuación (III.8) obtenemos:

$$\sigma_T = \sigma_{cw} \left[1 + \frac{2}{L} (n + \frac{s_w}{2}) \right] + \frac{2 m \rho \bar{v}^2}{2 L} \quad (III.12)$$

Ahora bien, combinando (III.12) con (III.10) en $r = R$

$$P_T = \tau_{cw} [2\gamma_e + 2n + 5w] + m \rho \bar{v}^2 \quad (\text{III3.13})$$

De la expresión

$$P_T = P_{corr} + m \rho \bar{v}^2 \quad (\text{III3.14})$$

Y de la ecuación (III3.13) obtenemos finalmente:

$$P_{corr} = \tau_{cw} (2\gamma_e + 2n + 5w) \quad (\text{III3.15})$$

Analizando los diferentes términos, tenemos que τ_{cw} es el esfuerzo cortante en la pared corregido por efectos de extremo, geometría y energía elástica.

En el anterior desarrollo, ha sido supuesto que para cada rapidez de corte, τ_{\parallel} depende sólo de τ_{cw} , condición que es discutible. (5). Por lo tanto, investigando τ_T y P_T a una rapidez de corte constante para capilares de diferentes relaciones L/R , podremos calcular, en principio, τ_{\parallel} a partir de datos de un viscosímetro capilar.

Analizando las ecuaciones (III3.12) y (III3.15) obtenemos:

	<u>ABC.</u>	<u>ORD.</u>	<u>PEND.</u>
$\tau_T = f(\gamma_e/L)$	$\frac{(\gamma_e)}{\tau_T \rightarrow 0} = -\frac{1}{n + 5w/2}$	$(\tau_T)_{L \rightarrow \infty} = \tau_{cw}$	$\tau_{cw} [n + (\frac{5w}{2})]$
$P_{corr} = f(\gamma_e/R)$	$\frac{(\gamma_e)}{P_{corr} \rightarrow 0} = -[n + 5w/2]$	$(P_T)_{L \rightarrow 0} =$ $\tau_{cw} [2n + 5w]$	$2 \tau_{cw}$

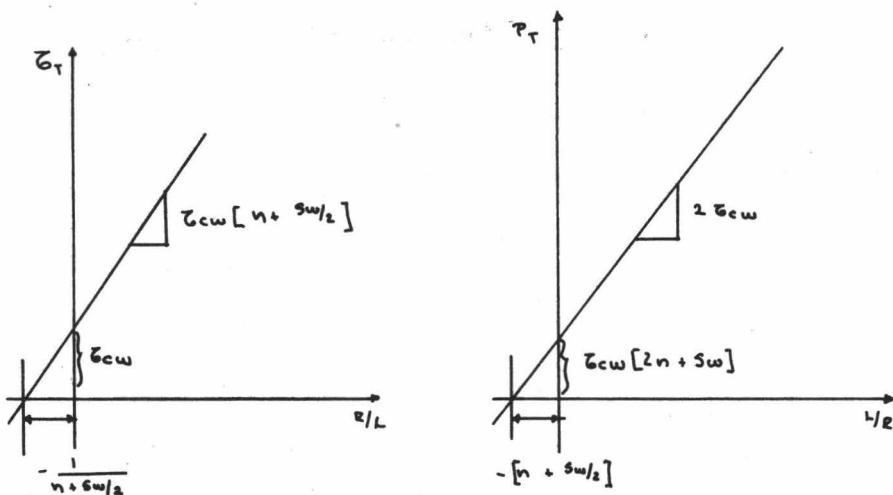


Fig. III.6

El procedimiento a seguir para determinar las propiedades elásticas a partir de un viscosímetro capilar sería como sigue:

- 1) Con ayuda de la ecuación (III.12) graficamos

$$\Ζτ = f(\epsilon/L)$$

y de la intersección en el eje de las abcisas

$$(\epsilon/L)_{\Ζτ \rightarrow 0} = -\frac{1}{n + sw/2}$$

y en el eje de las ordenadas

$$(\Ζτ)_{L \rightarrow \infty} = \Ζcω$$

de la pendiente

$$\Ζcω[n + sw/2]$$

- 2) Con la ayuda de la ecuación (III.13) graficamos

$$\Ζτ = f(1/\epsilon)$$

de la intersección en el eje de las abcisas

$$(1/\epsilon)_{\Ζτ \rightarrow 0} = -[n + sw/2]$$

y en el eje de las ordenadas $(Ζτ)_{L \rightarrow \infty} = \Ζcω(2n + sw)$

y de la pendiente

$$2 \gamma \omega$$

3) Con esta información y este método podemos obtener el esfuerzo normal en la pared del capilar con la ecuación:

$$(\gamma_{11})\omega = \gamma \omega \sin \omega. \quad (\text{III3.16})$$

CAPITULO IV

EQUIPO Y MATERIALES.

Este capítulo está dividido en dos partes:

- A) Descripción del viscosímetro y equipo complementario.
- B) Técnica experimental.

A) DESCRIPCION DEL VISCOSIMETRO Y EQUIPO COMPLEMENTARIO.

El viscosímetro consta de cuatro partes fundamentales:

- a) Cilindro de Pruebas (Viscosímetro).
- b) Dispositivos para control de presión.
- c) Dispositivos para control de temperatura.
- d) Capilares.

a) CILINDRO DE PRUEBAS. (Figura IV.1)

Consiste de un tubo de acero al carbón (cédula 80) de tres pulgadas de diámetro interno, recubierto internamente con una placa de acero inoxidable. Tiene bridas superiores e inferiores de acero al carbón con recubrimiento interior de acero inoxidable. Las bridas tienen un diámetro de doce pulgadas y un espesor de dos pulgadas. Para unir el cilindro con las bridas, existen en éstas, ocho perforaciones para tornillos de una pulgada de diámetro y seis y media pulgadas de largo. En la brida superior hay un orificio de

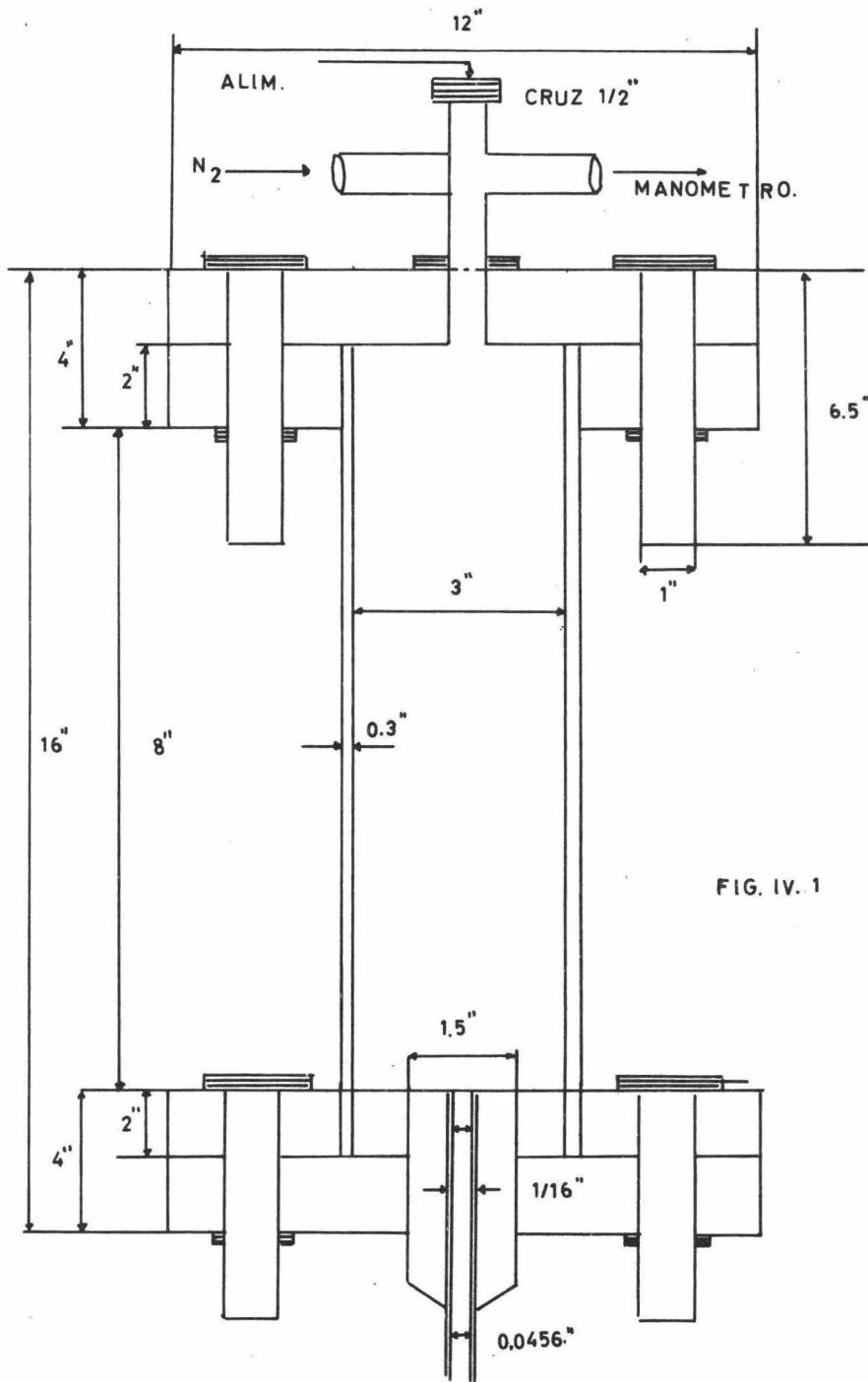


FIG. IV. 1

tres octavos de pulgada de diámetro interno al cual está conectada una cruz de hierro galvanizada de media pulgada. De esta cruz parten las conexiones al :

Cilindro de Nitrógeno

Manómetro

Alimentación del Fluido.

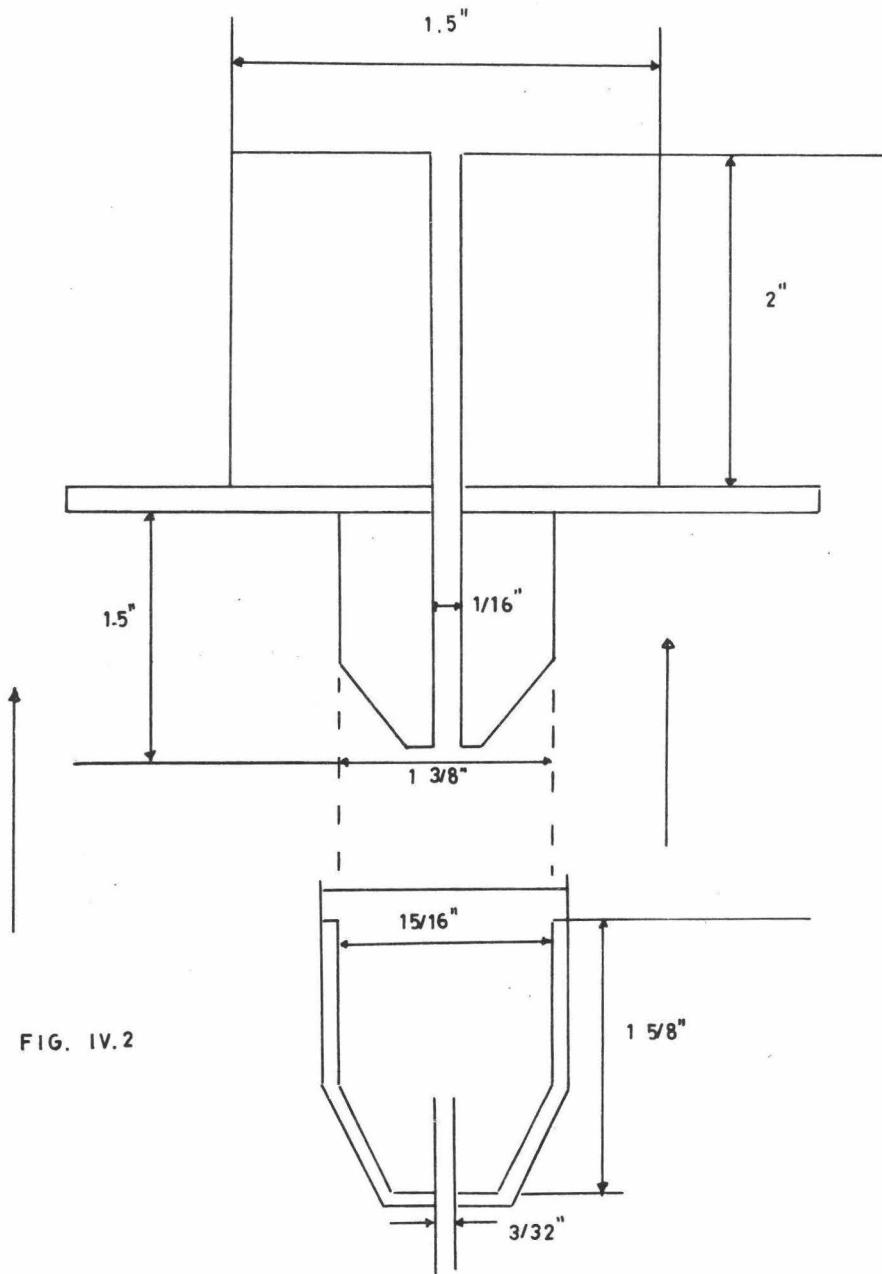
En la brida inferior existe un orificio de una y media pulgadas de diámetro interno al cual se atornilla la pieza intercambiable de capilares. Esta pieza consta de dos partes como se muestra en la figura IV.2 y está construida en acero inoxidable para resistir presiones hasta de 2000 lb/in^2 .

El cilindro tiene una capacidad máxima de dos litros y está diseñado para soportar presiones hasta de 2000 lb/in^2 .

b) CONTROL DE PRESIÓN.

Consta de las siguientes partes:

- i) Tanque de Nitrógeno (Marca ACA)
- ii) Manguera de Alta Presión (De plástico reforzado con malla de acero, para soportar hasta 80 kg/cm^2).
- iii) Tubería de Cobre de Alta Presión (3/8", presión de trabajo 120 kg/cm^2).
- iv) Regulador de Presión en el Tanque de Nitrógeno (Marca ACA, Modelo TMN-540, escala de 0-28 kg/cm^2).
- v) Manómetro en el Cilindro de Pruebas (Marca METRO, Bourdon de bronce con salida de tres octavos de pulgada, escala



de 0-a 56 ~~rev/min~~).

v) Válvula de Desfogue (3/8", de aguja, en bronce).

c) CONTROL DE TEMPERATURA.

Está formado por el siguiente equipo:

i) Regulador de Voltaje (Marca Koblenz, salida 125 v, 50/60 ciclos, 2.8 A, 300 watts).

ii) Regulador de Temperatura (Fisher Proportional Temperature Control)

115 v, 50/60 ciclos, 15 A

230 v, 50/60 ciclos, 7.5 A

Escala de temperatura: 0-250° C.

Salida: 750 watts.

iii) Resistencias Eléctricas (17,7 ohms, 690 watts)

iv) Ventilador:

Capacidad: 11m /min.

Motor: 1/32 Hp.

v) Termopar (Fisher Termo Probe, 0-150° C)

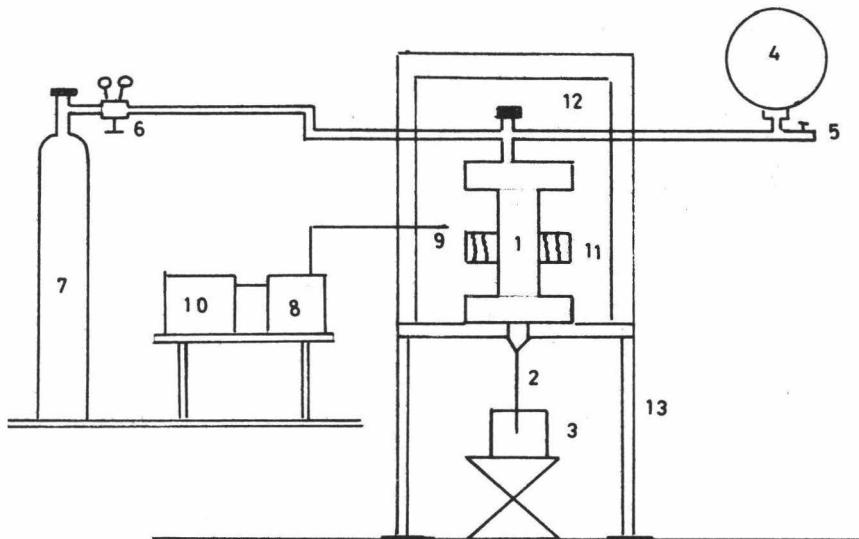
d) CAPTURAS.

De acero inoxidable de 1/16" de diámetro externo y 0.0456" de diámetro interno.

0.0456
0.0379 in

MONTAJE DEL EQUIPO.

A continuación se muestran varios diagramas del sistema experimental:



VISTA DE FREnte DEL EQUIPO.

Fig. IV.3

1) Cilindro de pruebas	8) Regulador de temperatura
2) Capilar	9) Termo Probe
3) Jugo de precipitados	10) Regulador de voltaje
4) anómetro	11) Resistencias eléctricas
5) Válvula de desfogue	12) Caja de madera
6) Regulador de presión	13) Soporte del cilindro.
7) Cilindro de nitrógeno	

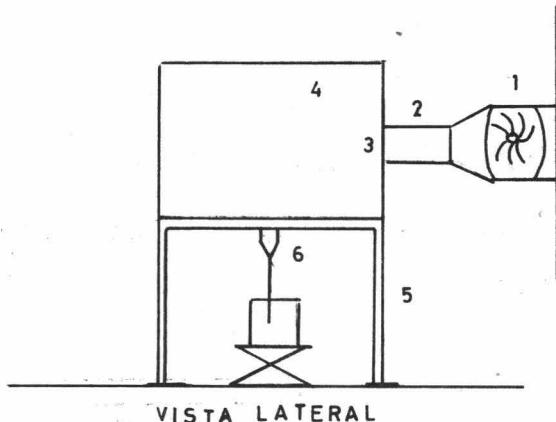


Fig. IV.4

1) Ventilador	4) Caja de madera
2) Ducto	5) Soporte del cilindro
3) Resistencias eléctricas	6) Capilar.

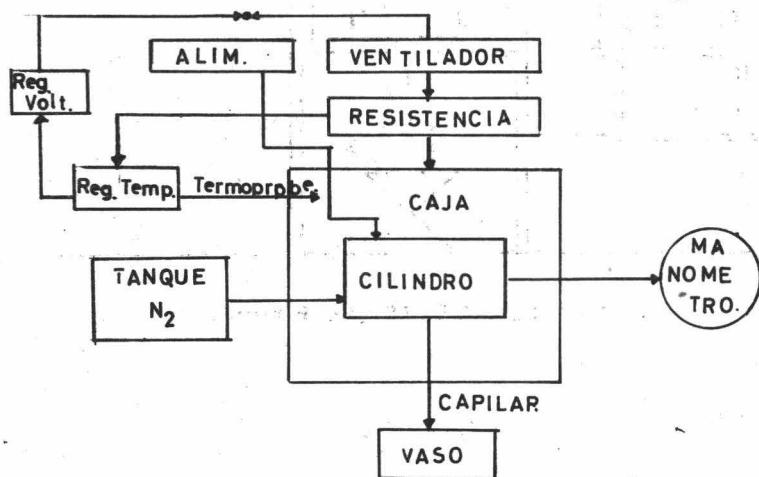


DIAGRAMA DE FLUJO.

Fig. IV.5

B) TÉCNICA EXPERIMENTAL.

La técnica experimental puede ser dividida en las siguientes partes:

- 1) Preparación de las soluciones.
- 2) Operación del Viscosímetro.

1) PREPARACION DE LAS SOLUCIONES.

Las soluciones que se prepararon son soluciones acuosas de:

Carboxilmethylcelulosa (CMC 40 PM, Derivados Macroquímicos)

Oxido de Etileno (POLICL NSR 301, Union Carbide).

Las concentraciones se tomaron bajo la consideración de g de soluto por litro de agua.

A continuación describiremos la técnica empleada para su preparación:

a) En un vaso de precipitados de 5 l se coloca un litro de agua destilada. Dentro del vaso se pone la propela del agitador, de tal manera que esté centrada para que la agitación sea homogénea. Esta propela está conectada al equipo regulador de velocidad Fisher Stedi Speed Stirrer.

Este equipo consta de dos unidades:

Motor de velocidad constante de 1/70 Hp equipado con rodamientos y dos flechas de salida, para las siguientes velocidades de agitación:

Baja (50-500 RPM a un torque de 5in/lb)

Alta (300-3000 RPM a un torque de 0.8in/lb)

Regulador de velocidad de 60 watts, 115 v, 50/60 ciclos AC o 230 v, 50/60 ciclos AC.

- b) Se debe tomar la temperatura del agua antes de proceder a la adición del soluto. Se arranca el agitador y se comienza a adicionar el soluto poco a poco para evitar que se formen grumos.
- c) En el caso de que el soluto sea CMC, éste puede ser adicionado sin importar que se formen grumos, puesto que la agitación inicial es sólo para dispersar el soluto. Una vez hecha la dispersión, se suspende la agitación y se deja reposar durante 24 horas con el objeto de que el soluto se humedezca. Cuando se desee emplear la solución, bastará iniciar la agitación y mantenerla hasta que la solución se haya homogeneizado.
- d) Tratándose de POLIOX, éste debe ser agregado al agua, lentamente, con el objeto de lograr una solución más o menos homogénea desde el principio. Una vez que todo el soluto ha sido adicionado, se deja la solución en agitación hasta que presente un aspecto homogéneo.
-) Es conveniente anotar el tiempo de preparación de las soluciones (Tiempo de adición del soluto y tiempo total de preparación) para preparar todas las soluciones de igual concentración en la misma forma. También es útil

saber la fecha de preparación, pues estas soluciones pueden presentar merma de viscosidad con el paso del tiempo.

- f) El vaso debe estar tapado, durante la agitación con un papel de aluminio para evitar lo más posible la evaporación del agua.
- g) Como último paso se determina la densidad de las soluciones por medio de un Piconómetro.

2) OPERACION DEL VISCOSÍMETRO.

La operación del viscosímetro es de lo más sencillo y consiste básicamente en la determinación de un gasto en masa y una caída de presión.

A continuación describiremos la técnica para las determinaciones:

- a) Arranque del ventilador y encendido del controlador de temperatura, al cual están conectadas las resistencias. Esta operación debe hacerse aproximadamente media hora antes de hacer las determinaciones, para que la temperatura en la caja haya alcanzado un valor constante. Todas las determinaciones fueron hechas a 27.5° C.
- b) El capilar con una determinada relación L/D se introduce en la parte inferior del viscosímetro y se ajusta por



medio de la pieza intercambiadora de capilares.

En el extremo inferior del capilar se debe colocar un tapón para evitar que el fluido se salga.

- c) El fluido se introduce en el viscosímetro por la parte superior de éste, por medio de un embudo de separación. En el caso de las soluciones poco concentradas el fluido cae por gravedad. En el caso de las soluciones más concentradas para que la operación de llenado sea más rápida, se hace fluir la solución aplicando una presión al embudo de separación. Se introduce un termómetro para medir la temperatura de la solución. El viscosímetro se cierra con un tapón herméticamente para evitar fugas.
- d) Se aplica presión por medio de nitrógeno contenido en un cilindro, con el objeto de desplazar al fluido contenido en el viscosímetro.
- e) Se quita el tapón del capilar para permitir que la solución fluya. Se abre el regulador de presión del cilindro de nitrógeno permitiendo el paso de nitrógeno al viscosímetro. En el manómetro colocado en la parte superior del viscosímetro se lee la presión deseada.
- f) Se permite que la solución fluya a través del capilar y por medio de un cronómetro y un vaso de precipitados

se mide el gasto en un determinado tiempo.

- g) La presión se aumenta a otro valor determinado y se repite el paso f) hasta abarcar todo el rango de presiones deseado.
- h) El gasto medido en un determinado tiempo, recogido en un vaso de precipitados previamente tarado, se pesa en una balanza granataria y por diferencia se obtiene el gasto en masa.
- i) El regulador de presión del tanque de nitrógeno se cierra para impedir el paso de nitrógeno al viscosímetro. Este se despresuriza por medio de una válvula de desfogue colocada a la salida del manómetro.

Este procedimiento, pasos (b-i) se repite para cada capilar con una relación L/D determinada y para cada solución particular.

CAPITULO V

RESULTADOS EXPERIMENTALES.

A continuación son presentados los datos experimentales directos y las diferentes tablas y gráficas que fueron necesarias para obtener los factores de corrección del viscosímetro capilar y las viscosidades de los diferentes materiales empleados.

La presentación de estos datos experimentales está dividida en 4 partes:

- a) Datos experimentales directos.
- b) Gráficas y tablas correspondientes al método de Bagley.
- c) Gráficas y tablas correspondientes al método de Brodkey.
- d) Confiabilidad del método experimental (Apéndice B).

De acuerdo con esta clasificación el material experimental se presenta bajo la siguiente numeración:

- a) Datos experimentales directos:

Tabla 1 : Corrección por energía cinética.

Gráfica 1 : $\Delta P \sim \dot{\gamma} \propto \dot{\gamma}^{1/D} = \text{cte.}$

Gráfica 2 : $\Delta P \sim \dot{\gamma} \propto \dot{\gamma} = \text{cte.}$

- b) Método de Bagley:

Tabla 3 : Factor de Corrección.

Tabla 4 : Esfuerzo cortante corregido contra rapidez de corte.

Gráfica 3 : $\gamma \sim \zeta_w$

Tabla 5 : Rapidez de corte corregida.

Gráfica 4 : Curva de flujo.

Tabla 6 : Viscosidad.

Gráfica 5 : Ley de la potencia.

c) Método de Brudney:

Tabla 7 : Corrección del esfuerzo cortante.

Gráfica 7 : $\log \zeta_w \sim \log (4Q/\pi e^2)$

Tabla 8 : Cálculo de n^* .

Tabla 9 : Curva de flujo.

Tabla 10 : Viscosidad.

DISCUSION DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.

El primer punto que se debe tratar al analizar los datos experimentales es el rango en el que se movieron las variables experimentales.

Tal como se demostró en la discusión del Capítulo III la caída de presión y el gasto volumétrico son las variables principales del experimento. Más aún, ya que el gasto volumétrico está íntimamente ligado a la rapidez de corte (Ec. III.6) en lo subsiguiente se ha usado a esta última y a la caída de presión como

variables fundamentales. Otra variable de mucha importancia es la relación L/D del capilar, puesto que es la que nos permite construir las diferentes gráficas necesarias. Los rangos en los cuales fueron manejadas estas variables son como sigue:

L/D.: 101.9 - 264

Rapidez de corte: $1 \times 10^2 \text{ seg}^{-1}$ - $2 \times 10^5 \text{ seg}^{-1}$

Caída de presión: 2 kg/cm^2 - 14 kg/cm^2 .

Estos valores, sobre todo los de la caída de presión y los de L/D, son bastante altos comparados con aquellos reportados en la literatura. (13), (16).

Debido a lo anteriormente citado, este trabajo se puede considerar como un estudio del comportamiento de fluidos No-Newtonianos a altos valores de rapidez de corte y esfuerzo cortante.

Analizando las gráficas obtenidas de los datos experimentales directos, se puede observar en las gráficas 1, que la relación entre la caída de presión y la rapidez de corte con respecto a L/D como parámetro es lineal para todas las soluciones y para todos los valores de L/D. En las gráficas 2, se observa que la relación entre la caída de presión y L/D a diferentes valores de rapidez de corte es lineal también. Sin embargo, en estas gráficas se presentaron algunos problemas no especificados en la literatura anteriormente citada. Las discrepancias con la literatura estriban en lo siguiente:

Las líneas rectas que tienen como parámetro a la rapidez

de corte, se cortan antes de llegar al eje de las abcisas. Esto trae como consecuencia que a mayores valores de rapidez de corte la intersección con el eje de las abcisas fuera más cercana al origen. Este comportamiento fué observado en las soluciones 1.5% y 3% de CMC y 3.5% de POLIOX. El comportamiento citado en la literatura dice que a mayor rapidez de corte, más lejana del origen estará la intersección con el eje de las abcisas. Este comportamiento fué observado en las soluciones 0.67% CMC y 1.5% y 2.5% POLIOX. Como se puede ver, las soluciones de mayor concentración presentan este problema.

Una posible explicación a la contradicción presentada, radica en lo siguiente:

Para el caso de las soluciones de menor concentración, a medida que la rapidez de corte aumenta, aumenta la corrección n . Al aumentar la corrección n , el esfuerzo cortante disminuye. Por lo tanto, la viscosidad de estas soluciones de baja concentración, con respecto a dos valores de rapidez de corte, es directamente proporcional a la relación de esfuerzos e inversamente proporcional a la relación de valores de rapidez de corte. Esto quiere decir, que la variación de la viscosidad está supeditada a la variación de estas dos relaciones entre sí.

En las soluciones más concentradas, a medida que aumenta la rapidez de corte, disminuye la corrección n . Al disminuir n , el esfuerzo cortante aumenta. Por lo tanto, la viscosidad de estas solu-

ciones con respecto a dos valores de rapidez de corte es directamente proporcional al esfuerzo cortante y a la rapidez de corte. Esto quiere decir que la solución sufre un cambio de viscosidad debido a la combinación de estos dos efectos.

Al punto de intersección de las líneas de rapidez de corte le corresponde un valor determinado de L/D y caída de presión. Posiblemente este punto podría ser considerado como un punto en el cual la estructura del polímero sufre cambios radicales, ya sea ruptura de cadenas moleculares o como se explica en el fenómeno de Pseudoplasticidad, todos los ejes principales de las moléculas han sido alineados completamente en la dirección del flujo.

Esta explicación puede ser lógica dado que las soluciones de baja concentración pueden alinearse casi instantáneamente a la entrada del capilar, mientras que las soluciones de mayor concentración necesitan recorrer una cierta distancia en el capilar para alcanzar este alineamiento.

Se ha descartado la posibilidad de que este fenómeno fuera debido a que se hubiera rebasado el límite elástico del material, dado que principalmente en la solución de POLIUX 3.5% se pudo observar claramente el fenómeno de Engrosamiento, típico de materiales viscoelásticos. Esto no hubiera podido ser observado si el fluido se hubiera deformado irreversiblemente.

Pasaremos ahora a analizar los datos experimentales desde dos puntos de vista:

a) Con respecto al comportamiento de los materiales.

b) Comparación entre los dos métodos de análisis empleados.

Con respecto al comportamiento de los materiales todos presentaron la característica de ser Pseudoplásticos o sea que a mayor rapidez de corte o esfuerzo cortante el valor de la viscosidad disminuye. Se hizo el análisis de que grado de Pseudoplasticidad tenía cada material, por medio del modelo de la ley de la potencia. Lo primero que se encontró fué que dicho modelo no es muy adecuado para representar a estos materiales, a lo largo de todo el rango de rapidez de corte, dado que el valor del índice de flujo no permaneció constante. Como se vió en el Capítulo I, la ley de la potencia falla para valores grandes de $\dot{\gamma}$ o τ . Además predice una viscosidad cero cuando $\dot{\gamma}$ o τ tienden a infinito.

A continuación damos una tabla de los diferentes valores del índice de flujo para los diferentes materiales.

De la tabla podemos ver que mientras nos encontremos en la zona de bajos valores de rapidez de corte y en las soluciones de baja concentración, el índice de flujo permanece constante en un rango mayor de rapidez de corte. Por otra parte, en la zona de bajos valores de rapidez de corte el carácter de los fluidos se aleja más del carácter Newtoniano. Sin embargo, es importante ver que a altos valores de rapidez de corte todos los fluidos estudiados se acercan más al comportamiento Newtoniano. Como se estableció anteriormente la ley de la potencia falla en este rango.

LEY DE LA POTENCIA (INDICE DE FLUJO).

MATERIAL	$f(\zeta\omega) \text{ seg}^{-1}$	n
0.67 % CMC.	$1 \times 10^4 - 20 \times 10^4$	0.88
1.5 % CMC.	$0.5 \times 10^4 - 2.5 \times 10^4$ $2.5 \times 10^4 - 15 \times 10^4$	0.569 0.81
3% CMC.	$0.5 \times 10^4 - 0.95 \times 10^4$ $1 \times 10^4 - 2.5 \times 10^4$ $2.5 \times 10^4 - 5 \times 10^4$ $5 \times 10^4 - 15 \times 10^4$	0.333 0.52 0.70 0.78
1.5 % POLIOX.	$6 \times 10^4 - 15 \times 10^4$ $1.5 \times 10^4 - 30 \times 10^4$	0.52 0.358
2.5% POLIOX.	$0.65 \times 10^4 - 1.65 \times 10^4$ $1.65 \times 10^4 - 2.6 \times 10^4$ $2.6 \times 10^4 - 3.6 \times 10^4$ $3.6 \times 10^4 - 15 \times 10^4$	0.411 0.478 0.564 0.834
3.5% POLIOX.	$0.14 \times 10^4 - 0.3 \times 10^4$ $0.3 \times 10^4 - 0.7 \times 10^4$ $0.7 \times 10^4 - 1.9 \times 10^4$ $2 \times 10^4 - 15 \times 10^4$	0.31 0.523 0.688 0.85

Por último, se trató un aceite (Femex Sol 50). Este fluido presentó, como era de esperarse, un comportamiento Newtoniano, o sea, se obtuvo un valor constante de la viscosidad independiente de la relación L/D. Además se hicieron pruebas a diferentes temperaturas y se obtuvieron valores congruentes de la viscosidad, dado que la viscosidad de un líquido disminuye al aumentar la temperatura. El objeto de usar un líquido que se comportara como Newtoniano tuvo por objeto probar la confiabilidad del aparato ya que forzosamente debería reportar un valor constante de la viscosidad a una temperatura dada.

Por lo que se refiere a los dos métodos empleados, se discutirán aquí sólo sus ventajas y desventajas en la práctica, ya que el fundamento de los métodos ya fué discutido con anterioridad.

Método de Bagley.

Este método involucra una gran cantidad de cálculos para obtener el valor de la viscosidad. A partir de este método son encontrados los factores de corrección del viscosímetro. Por medio de estos factores es corregido el esfuerzo cortante y posteriormente la rapidez de corte. Estas correcciones involucran una gran cantidad de cálculos. Los resultados obtenidos por este método son más precisos dado que se necesita en menor grado el uso de gráficas y en consecuencia elimina errores de apreciación por parte del investigador. La aplicabilidad de este método abarca un

rango más amplio de rapidez de corte.

En resumen, el método de Bagley presenta las ventajas siguientes;

- a) Aplicabilidad en un rango mayor de rapidez de corte.
- b) Mayor exactitud en los resultados.

Como desventajas: Gran volumen de cálculos.

Método de Brodkey.

Este método se caracteriza por emplear correcciones sencillas para la rapidez de corte y el esfuerzo cortante, evitando así un gran número de cálculos. Sin embargo, este método está basado en parte, en datos obtenidos gráficamente por lo cual no es muy exacto.

Por lo tanto, este método presenta como ventaja el menor número de cálculos que se deben efectuar y como desventaja su inexactitud en la región de rapidez de corte baja. Los resultados obtenidos por ambos métodos pueden ser comparados y se observa que a partir de un valor de rapidez de corte determinado, podremos decir que son prácticamente iguales.

Por último, nos referiremos a la obtención de los datos experimentales directos o dicho de otra forma, al viscosímetro en sí y al método de valoración de los datos.

El funcionamiento del viscosímetro está sujeto a lo que se llama Errores sistemáticos que son debidos a errores en los aparatos de medición como en este caso pueda ser el manómetro. Estos errores

pueden ser eliminados usando instrumentos de mayor precisión.

El otro tipo de error es el Error estadístico que es producido por pequeñas variaciones que afectan a las mediciones y que no pueden ser predichos. Este tipo de error es el que más se presentó en las mediciones del gasto en masa, ya que éstas dependen de la exactitud de la observación hecha por el investigador.

Mediante un análisis estadístico de los datos del viscosímetro que es presentado en el Apéndice B, se llegó a la conclusión de que el aparato tiene una confiabilidad del 90%.

CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fué el diseño, construcción y operación de un viscosímetro capilar.

Desde el punto de vista experimental, este objetivo fué cubierto ampliamente, dado que el aparato funciona con una confiabilidad del 90 %, siendo además su operación de lo más sencilla.

Dentro del aspecto experimental, se pudo hacer la comparación entre las diferentes soluciones poliméricas empleadas, pudiendo constatar que todas ellas presentaron carácter pseudoplástico. El grado de pseudoplasticidad fué en aumento al incrementarse la concentración de ambas soluciones. Más aún, se observó que las soluciones de óxido de etileno presentan un mayor grado de viscoelasticidad que las de carboximetilcelulosa. Esto se pudo observar claramente debido al engorgamiento de la corriente de salida del capilar.

En el aspecto teórico se hizo la comparación entre los métodos de análisis de los resultados experimentales.

Se demostró que el método de Bagley, aún cuando involucra un gran número de cálculos, puede ser considerado como el método de mayor exactitud para un rango mayor de rapidez de corte.

El método de Bredkey puede ser considerado como un buen método de análisis para rangos de rapidez de corte más limitados, ya que

para rangos más amplios puede involucrar errores de especiación por parte del investigador debido al uso de gráficas. Puede considerarse como una buena primera aproximación para el tratamiento del caso más general.

Como se mencionó con anterioridad este trabajo pretende ser el primer paso para el desarrollo de un viscosímetro capilar más adecuado.

Para lograr este objetivo, en base a la operación del viscosímetro, se proponen las siguientes modificaciones al mismo:

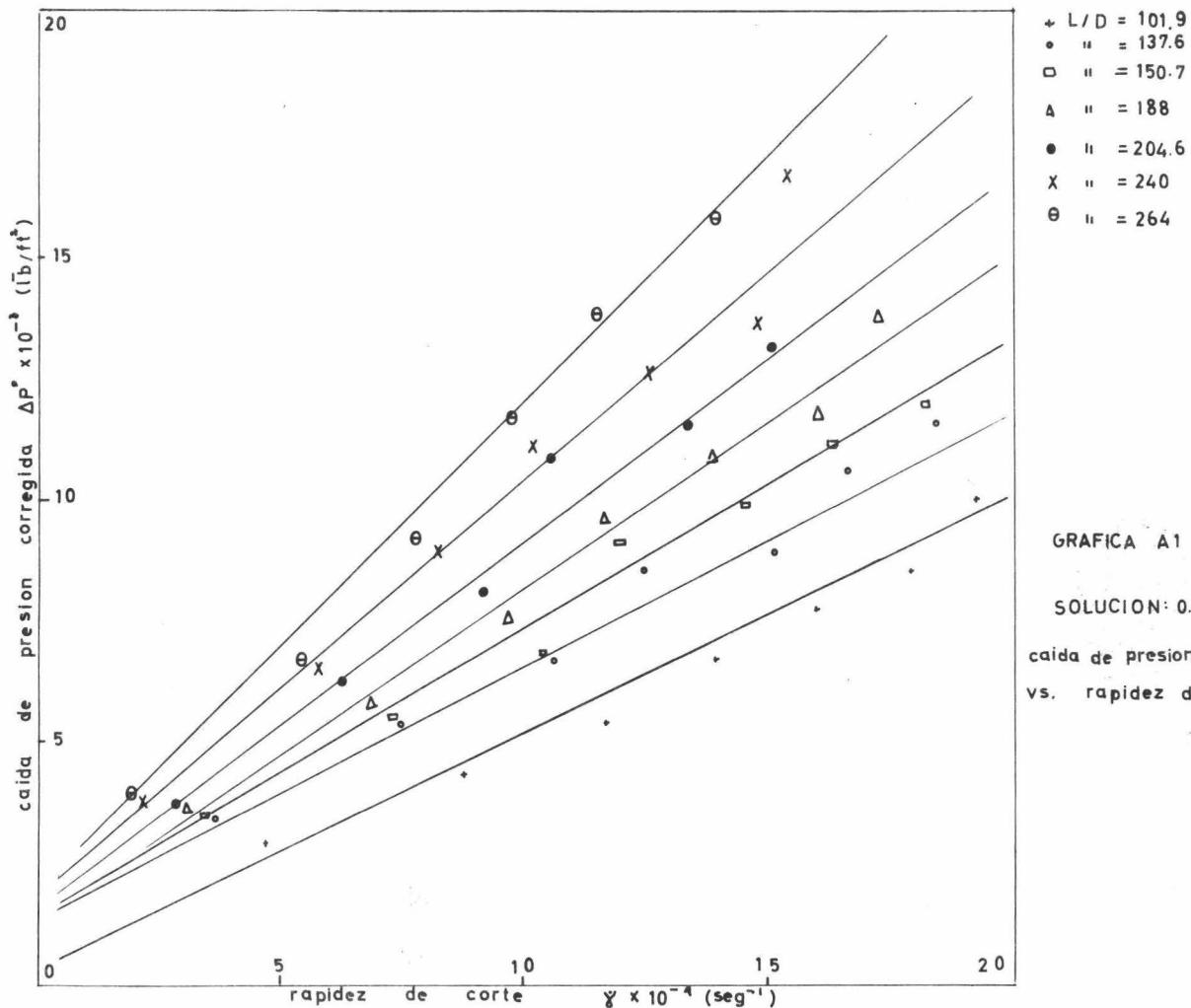
- a) Para poder efectuar mediciones a bajas caídas de presión, se debe usar un manómetro de mayor precisión.
- b) Dado que la temperatura es una variable muy importante en el cálculo de la viscosidad, es conveniente tener un termópoco en el cilindro de pruebas.
- c) La medición del gasto en masa presentó la mayor imprecisión. Con el fin de evitar estas imprecisiones se podría adaptar un timer en el fondo del cilindro de pruebas para cerrar el paso del fluido por el capilar. Esto haría que el tiempo de medición fuera siempre el mismo.
- d) con el fin de lograr que los capilares permanecieran perfectamente rectos, se podría diseñar algún dispositivo para este efecto. Este podría ser un tubo de acero que recubriera el capilar.
- e) Sería conveniente colocar un dispositivo para reducir la presión dada por el cilindro de nitrógeno antes de la entrada del cilindro de pruebas.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

TABLEA A1
CORRECCTION ENERGIA CINETICA.
SOLUCION 0.67% CMC.
DENSIDAD: 1.0027 g/cm³.

L/D	ΔP lb/ft ²	Q ft ³ /seg $\times 10^4$	V ft/sec	ΔP^2 lb/ft ²	\dot{V} seg ⁻¹ $\times 10^{-4}$
101.2	4095.36	2.545	22.521	2080.674	4.710
	8190.72	4.752	42.053	4335.488	8.795
	12286.08	6.343	56.132	5417.333	11.741
	16381.44	7.533	66.663	6623.409	13.943
	20476.8	8.624	76.318	7778.333	15.967
	24572.16	9.701	85.849	8504.175	17.956
	28667.52	10.437	92.262	10070.175	19.318
137.6		2.0169	17.84	3400.866	3.732
		4.0656	35.97	5368.772	7.525
		5.7481	50.87	6645.183	10.639
		6.7478	59.71	8607.808	12.490
		8.2262	72.79	8923.711	15.426
		9.3288	79.90	10654.711	16.712
		10.0144	88.62	11542.719	18.536
150.7		1.9	16.81	3479.019	3.518
		3.96	35.04	5512.463	7.244
		5.67	50.17	6797.428	10.509
		6.52	57.70	9123.588	12.073
		7.88	69.73	9875.673	14.594
		9.37	78.43	11422.74	16.111
		9.89	87.52	11968.45	18.315

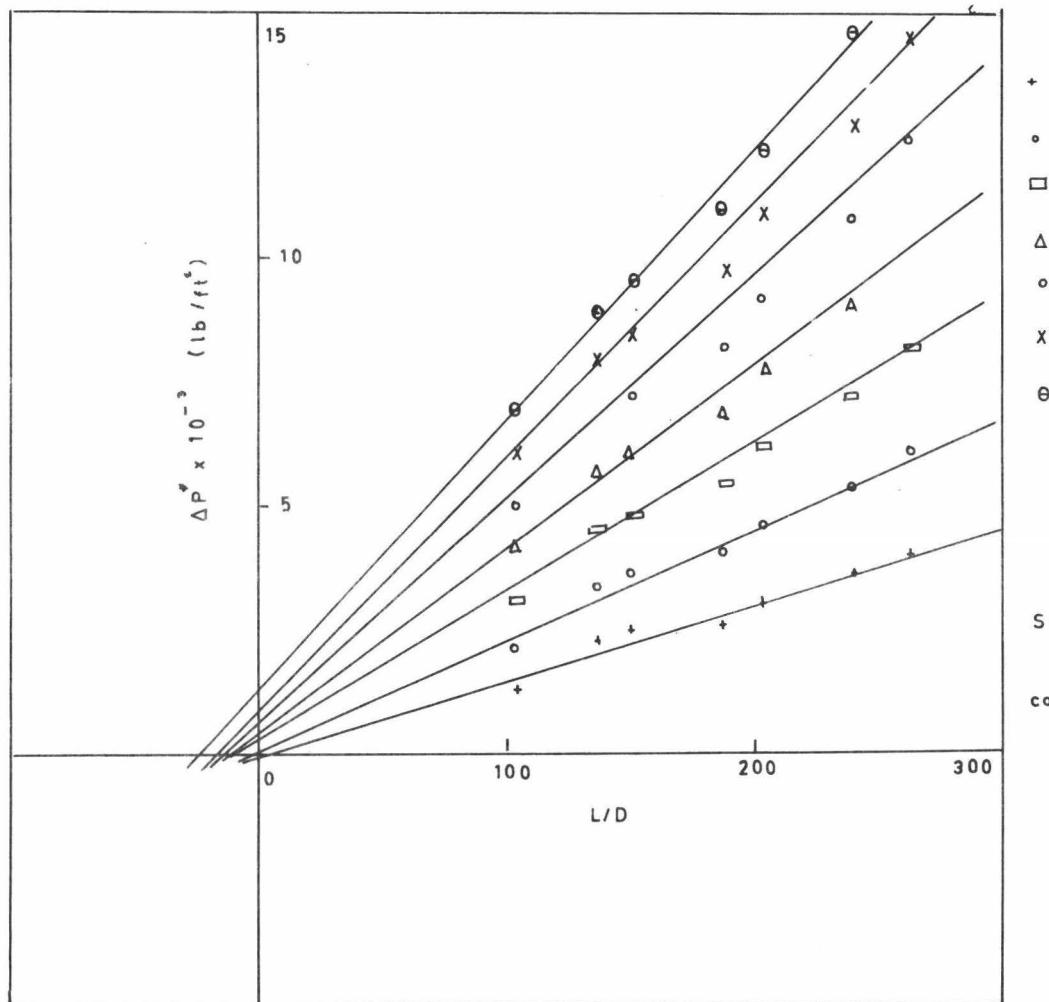
L/D	$\Delta P \bar{b} / ft^2$	$Q ft^3/seg \times 10^4$	$v ft/seg$	$\Delta P^* \bar{b} / ft^2$	$\gamma \frac{seg^2}{10^4}$
133		1.682	14.80	3612.355	3.114
		3.717	32.89	5831.954	6.808
		5.277	46.25	7621.586	9.607
		6.394	55.78	9596.710	11.669
		7.487	66.25	10906.727	13.858
		8.655	76.59	11783.244	16.021
		9.106	82.36	13882.372	17.227
204.6		1.58	12.98	3669.159	2.925
		3.414	30.21	6200.841	6.32
		4.087	44.33	8040.097	9.232
		5.747	50.63	10781.880	10.600
		7.251	64.17	11500.541	13.422
		8.163	72.24	13195.909	15.109
		1.107	10.681	3846.638	2.234
240		3.129	27.69	6519.203	3.792
		4.452	39.39	8902.24	8.254
		5.558	49.18	11107.482	10.228
		6.793	60.11	12598.676	12.574
		8.025	71.01	13577.301	14.855
		8.37	74.07	16706.988	15.493
		1.052	9.31	3906.417	1.948
264		2.914	25.78	6741.018	5.394
		4.127	37.4	9235.629	7.825
		5.282	48.56	11654.27	9.74
		6.351	55.32	13805.683	11.571
		7.163	63.39	15812.284	13.982



GRAFICA A1

SOLUCION: 0.67% CMC.

caida de presion corregida
vs. rapidez de corte.



$+\quad \dot{V} = 2 \times 10^4$
 $\circ\quad \dot{V} = 4 \text{ lb}$
 $\square\quad \dot{V} = 6 \text{ lb}$
 $\Delta\quad \dot{V} = 8 \text{ lb}$
 $\circ\quad \dot{V} = 10 \text{ lb}$
 $x\quad \dot{V} = 12 \text{ lb}$
 $\theta\quad \dot{V} = 14 \text{ lb}$

GRAFICA A 2

SOLUCION: 0.67 % CMC.

caida de presion corregida

v s. L/D.

TABLE 12

EFFECT OF CORRECTION.

SOLUTION.	RADIATION CORR. $\times 10^{-4}$	FINAL CORRECTION
0.67% CMC	1	11.957
	2	-0.114
	3	-0.767
	4	-1.159
	5	-0.605
	6	-8.527
	8	-11.162
	9	-12.175
	10	-13.971
	11	-13.887
	12	-14.271
	13	-14.824
	14	-15.295
	16	-16.059
	17	-16.124
	18	-16.690
	19	-16.764
	20	-17.205

TABELA A

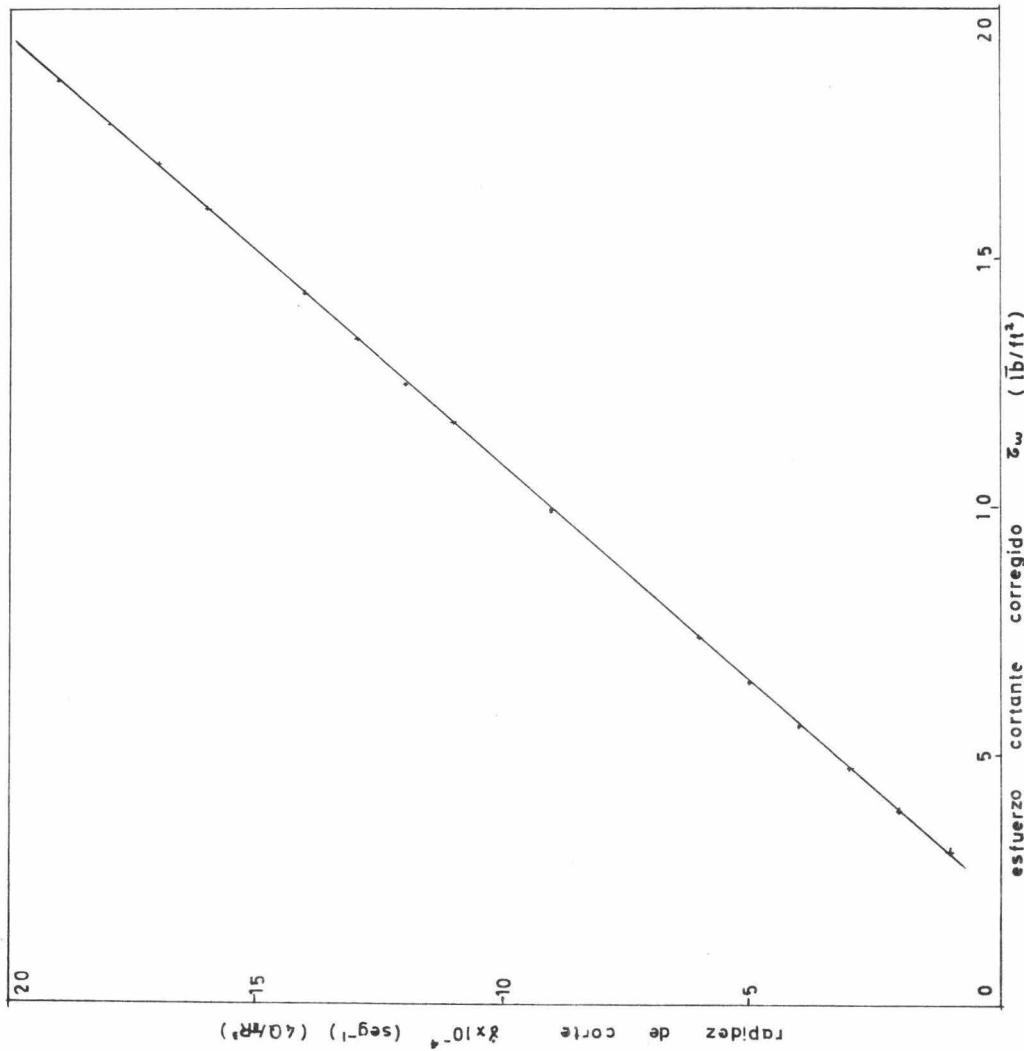
SUFACIAIS QUADRATICAS CORRIDAS VS. RÁTIOES DE CORTES.

$\dot{\gamma} \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	$\tau_w \text{ lb/ft}^2$
1	2.987
2	3.827
3	4.687
4	5.548
5	6.408
6	7.268
8	8.991
9	9.850
10	10.771
11	11.573
12	12.435
13	13.295
14	14.155
16	15.878
17	16.757
18	17.599
19	18.458
20	19.320

GRAFICA A 3

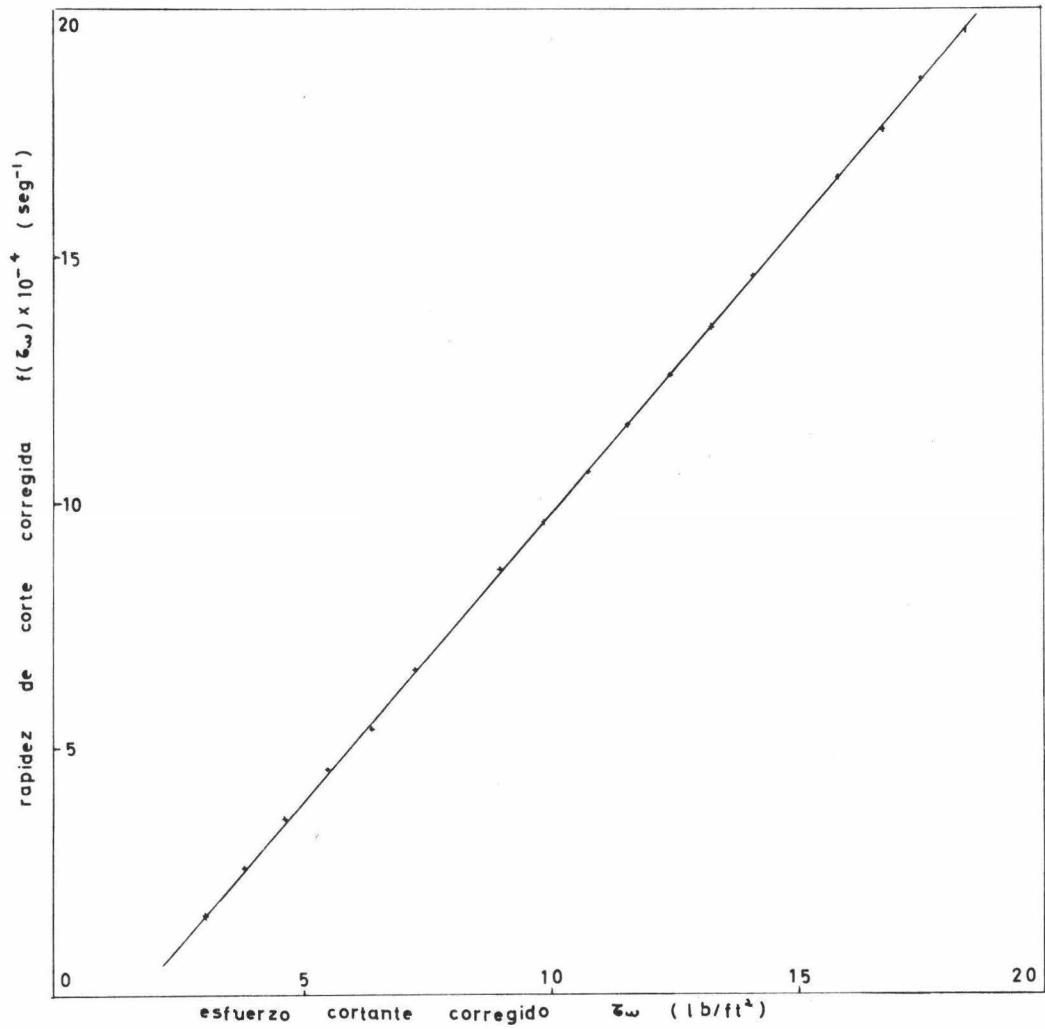
SOLUCION: 0.67 % C M.C.

rapidez de corte vs.
esfuerzo cortante corregido.



RÁPIDA DE CORTE CORRECTA.

ζ_w lb/ft ²	$\frac{\zeta_w}{4}$ lb/ft ²	$\dot{\gamma} \times 10^{-4}$ seg ⁻¹	$\frac{3/4 \dot{\gamma}}{4 \zeta_w} \times 10^{-4}$ seg ⁻¹	$\frac{d \dot{\gamma}}{d \zeta_w} \times 10^{-4}$	$f(\zeta_w) \times 10^{-4}$ seg ⁻¹
2.967	0.7417	1	1.166	0.75	1.615
3.827	0.9507	2	"	1.5	2.615
4.687	1.1717	3	"	2.25	3.616
5.548	1.387	4	"	3.00	4.617
6.408	1.602	5	"	3.75	5.367
7.268	1.817	6	"	4.50	6.618
8.991	2.247	8	"	6.00	8.620
9.850	2.4625	9	"	6.75	9.621
10.771	2.6927	10	"	7.50	10.639
11.573	2.8932	11	"	8.25	11.623
12.435	3.1087	12	"	9.00	12.624
13.295	3.3237	13	"	9.75	13.625
14.155	3.5387	14	"	10.50	14.626
15.878	3.9695	16	"	12.00	16.628
16.757	4.1892	17	"	12.75	17.634
17.599	4.3997	18	"	13.50	18.630
18.458	4.6145	19	"	14.25	19.630
19.320	4.8300	20	"	15.00	20.631



GRAFICA A4

SOLUCION: 0.67% CMC.

curva de flujo

$$\eta = \frac{\tau \omega}{f(5\omega)} \times 4.791 \times 10^4 \text{ (cp)}$$

$\zeta \omega$	$\bar{f}/f\zeta^2$	$f(5\omega) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	η	cp
4.087		1.015		8.800
5.027		2.025		7.012
4.087		3.016		5.410
5.042		4.017		5.757
6.408		5.007		5.720
7.208		6.010		5.452
8.931		8.020		4.197
9.250		9.621		6.205
10.771		10.639		6.850
11.573		11.622		6.770
12.435		12.624		6.719
13.295		13.625		4.675
14.155		14.626		6.625
15.026		15.628		4.575
16.757		17.634		6.552
17.599		18.636		6.507
18.458		19.630		6.505
19.320		20.631		6.505

LOG ζ_{ω} (lb/ft²)

1000

100

10

10³

10⁴

10⁵

10⁶

LOG $f(\zeta_{\omega})$ (seg⁻¹)

GRAFICA A 5

SOLUCION: 0.67 % CMC.

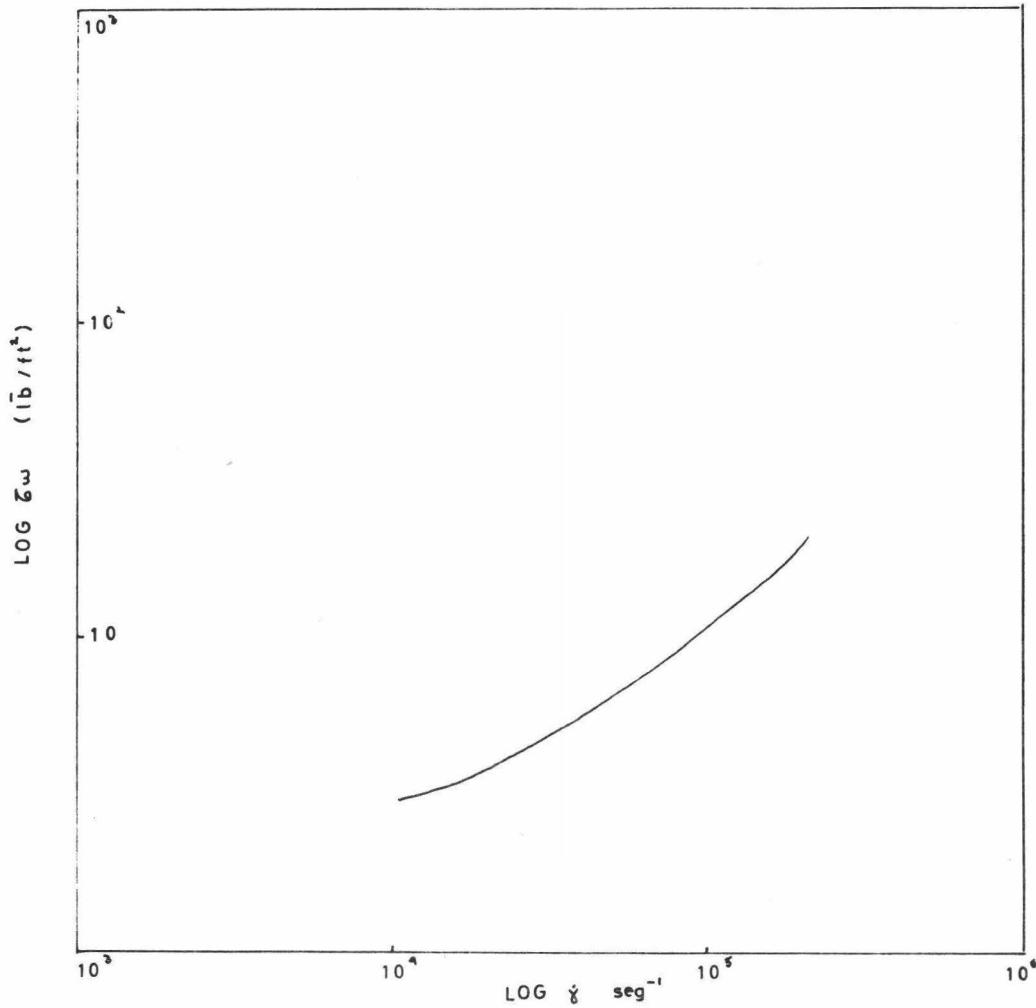
Ley de la Potencia.

TABLE II

SUSPENDED CONCENTRATION.

$\frac{d\Delta P}{d\Delta D}$	$\bar{L}b/ft^2$	$\gamma \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$	$\tau \omega$	$\bar{L}b/ft^2$
11.77		1		2.967
12.17		2		3.237
12.57		3		3.707
12.97		4		5.520
13.37		5		6.450
13.76		6		7.320
14.16		7		9.047
14.56		8		9.932
14.96		9		10.805
15.35		10		11.675
15.75		11		12.547
16.15		12		13.417
16.55		13		14.287
16.95		14		16.030
17.35		15		16.900
17.75		16		17.770
18.15		17		18.640
18.55		18		19.517

- 204 -



GRAFICA A7

SOLUCION: 0.67 % CMC,
Calculo de n^1 .

TABLA N° 6

CALCULO DE n^i .

$\dot{\gamma} \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	n^i	$\frac{3n^i + 1}{4n^i}$	$f(\tau\omega) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$
1	0.8	1.062	1.062
2	0.9	1.028	2.056
3	"	"	3.084
4	1	1	4.000
5	"	"	5.000
6	"	"	6.000
8	"	"	8.000
9	"	"	9.000
10	"	"	10.000
11	0.86	1.041	11.447
12	"	"	12.488
13	"	"	13.529
14	"	"	14.569
16	"	"	16.651
17	"	"	17.692
18	"	"	18.732
19	"	"	19.773
20	"	"	20.814

TABLA A9 Y TABLA A10

VISCOSIDAD.

$\zeta\omega$	\bar{M}/ft^2	$f(\zeta\omega) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	η	cP
2.947		1.062	13.385	
3.837		2.056	8.491	
4.707		3.084	7.312	
5.580		4.000	6.683	
6.450		5.000	6.180	
7.320		6.000	5.845	
9.062		8.000	5.427	
9.932		9.000	5.287	
10.805		10.000	5.176	
11.675		11.447	4.886	
12.547		12.488	4.813	
13.417		13.529	4.751	
14.287		14.569	4.698	
16.030		16.651	4.612	
16.900		17.692	4.576	
17.770		18.732	4.545	
18.640		19.773	4.516	
19.512		20.814	4.491	

$$1 \text{ ft}^3/\text{s} = 0.02832 \text{ m}^3/\text{s} \times \frac{1000 \text{ dm}^3}{1 \text{ m}^3}$$

$$= 28320 \text{ dm}^3/\text{s}$$

$$\frac{lb}{ft^2} (478.8) = \frac{lb}{ft^2}$$

$$0.0001449$$

TABLA B1

CORRECCION ENERGIA CINETICA.

SOLUCION 1.5% CMC.

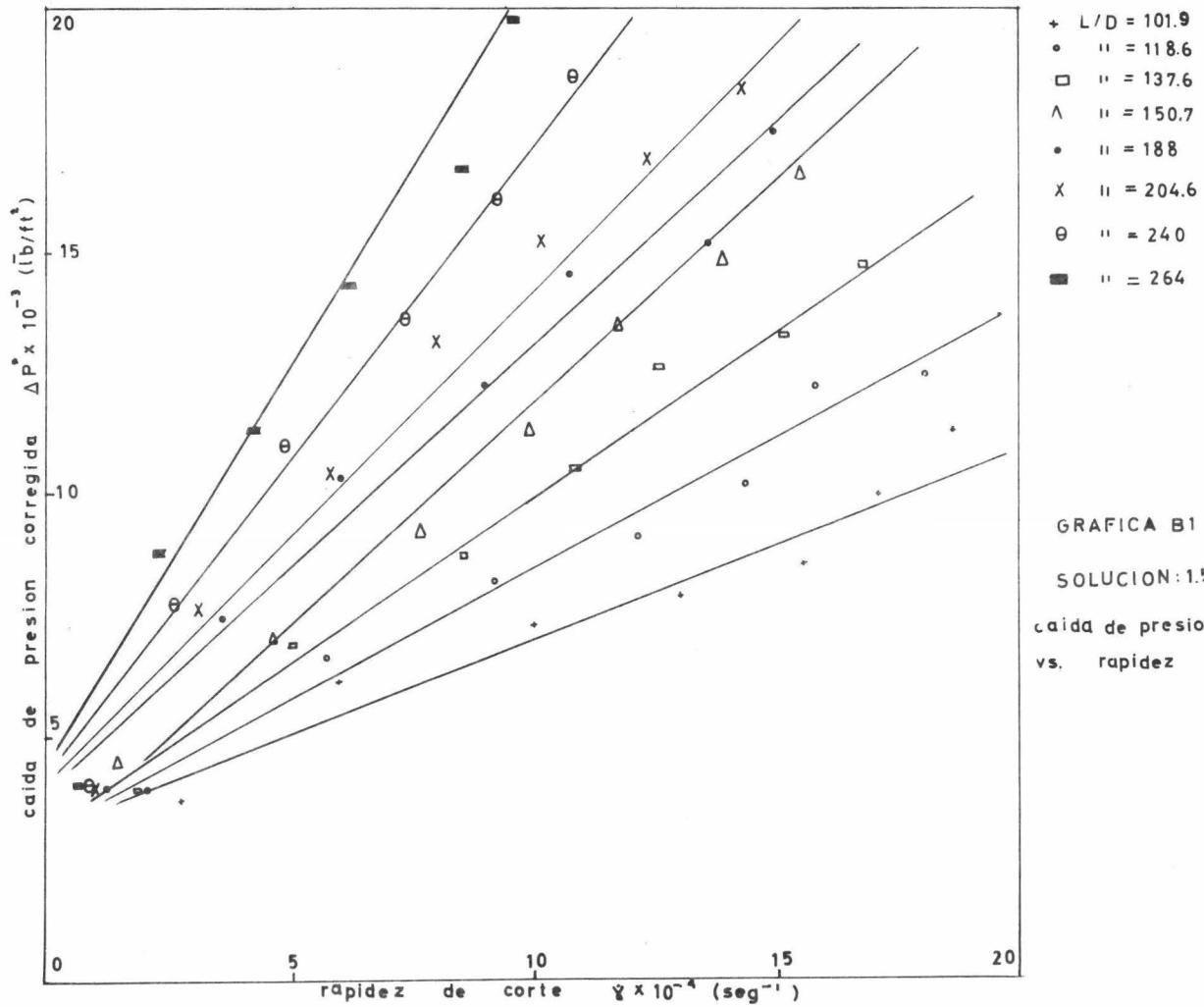
$$R = 0.057912$$

DENSIDAD: 1.0078 g/cm³

L/D	$\Delta P \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2}$	$Q \frac{\text{ft}^3/\text{seg}}{\times 10^4}$	$v \text{ ft/sec}$	$\Delta P^* \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2}$	$\dot{V} \frac{\text{m}^3}{\text{seg}} \times 10^{-4}$	$\frac{\Delta P \text{ dm}^3}{C}$
118.02 ⁴	4095.36	1.449	12.82	3737.071	2.682	151 605.56
	8190.72	4.21968	28.49	17893.095	5.960	260 469.6
	12286.08	3.220	47.76	6420.565	9.939	296 683.69
	16381.44	9.11904	62.50	7313.241	13.073	319 051.65
	20476.80	5.397	73.96	7864.610	15.470	346 878.41
	24572.16	15.284300	81.95	8550.239	17.142	402 826.47
	28667.52	7.063	89.04	9929.656	18.625	461 768.19
		20.0064		11382.567		
118.6		1.074	9.50	3898.431	1.988	
		3.083	27.28	6567.988	5.707	
		4.938	43.70	8123.125	9.141	
		6.527	57.76	9108.219	12.032	
		7.745	68.53	10235.799	14.336	
		8.512	75.32	12202.356	15.755	
		9.758	86.36	12408.972	18.062	
137.6		1.022	9.04	3917.039	1.891	
		2.740	24.24	6908.977	5.072	
		4.592	40.63	8686.073	8.499	
		5.824	51.54	10590.590	10.780	
		6.723	59.49	12760.203	12.445	
		8.158	72.19	13209.841	15.101	
		9.027	80.06	14693.906	16.746	

150.7		0.763	6.752	3995.968	1.412
		2.52	22.300	7106.512	4.664
		4.147	36.69	9350.002	7.667
		5.383	47.63	11434.367	9.963
		6.349	56.18	13594.871	11.752
		7.514	66.9	14932.939	13.909
		8.382	74.17	16672.668	15.516
188.0		0.644	5.70	4024.553	1.192
		1.935	17.12	7551.483	3.582
		3.300	29.20	10426.875	6.109
		4.965	43.05	12341.241	9.005
		7.409	65.56	15200.452	13.714
		8.081	71.51	17518.677	14.958
204.6		0.532	4.70	4047.444	0.984
		1.687	14.93	7704.839	3.122
		3.167	28.02	10573.718	5.863
		4.319	38.22	13196.759	7.994
		5.516	48.81	15283.133	10.210
		6.688	59.18	16935.700	12.380
		7.752	68.60	18407.999	14.349
240		0.465	4.11	4058.444	0.861
		1.389	12.29	7861.334	2.571
		2.646	23.41	11090.774	4.897
		3.969	35.12	13692.001	7.346
		5.001	44.25	16206.944	9.257

		5.886	51.91	18697.437	10.357
		7.136	65.15	19973.728	13.209
		0.388	3.44	4069.592	0.719
		1.221	10.80	7936.194	2.26
		2.289	20.25	11391.558	4.236
264		3.384	29.94	14426.380	6.264
		4.623	40.91	16828.023	8.553
		5.218	46.17	19923.715	9.659
		6.545	57.92	21354.128	12.114



GRAFICA B1

SOLUCION: 1.5 % CMC.

caida de presion corregida
vs. rapidez de corte.

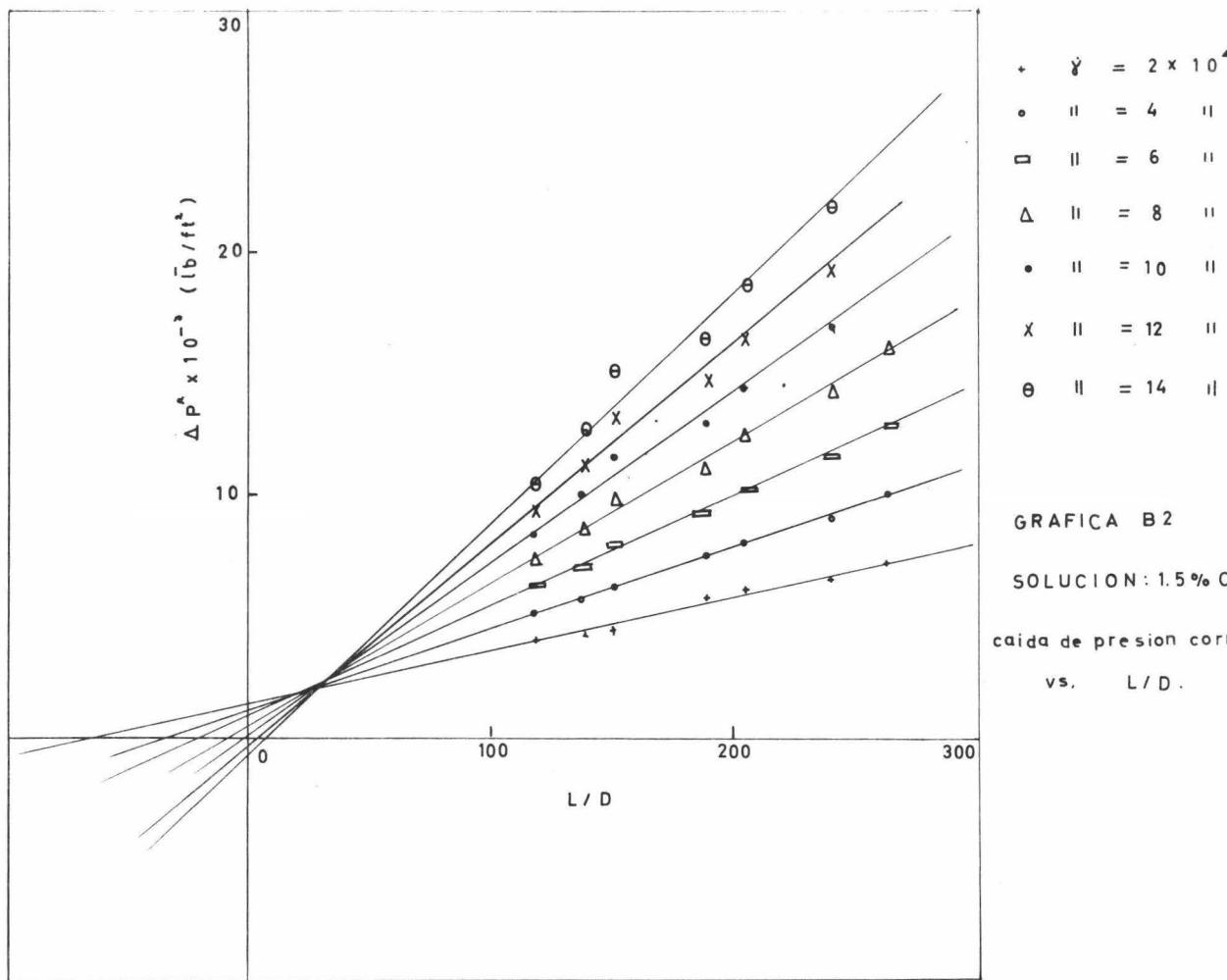


TABLA B 3 .

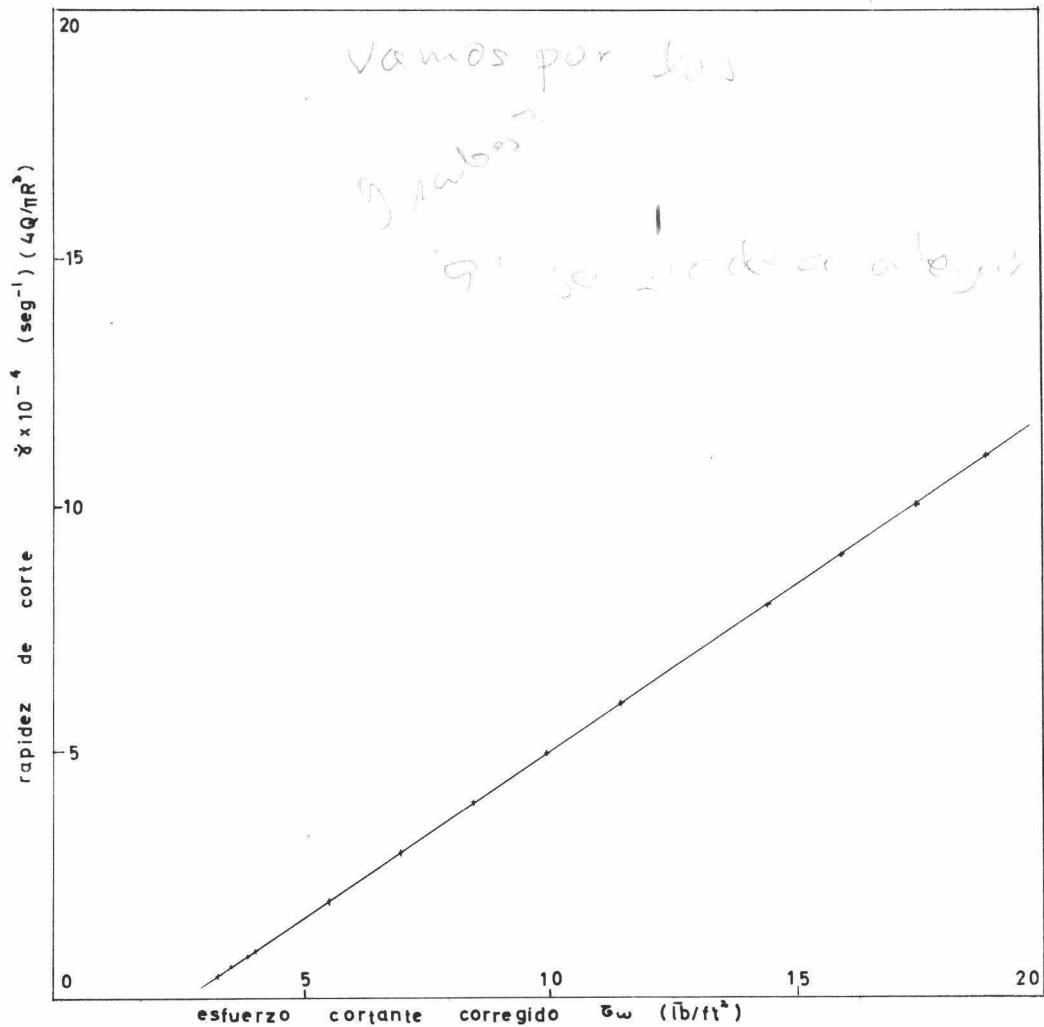
FACTOR DE CORRECCION.

	$\dot{\gamma} \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	n
1.5% CHC.	0.5	-122.87
	0.7	-110.58
	0.9	-100.20
	1.0	- 95.50
	2.0	- 62.87
	3.0	- 44.59
	4.0	- 32.57
	5.0	- 24.12
	6.0	- 17.88
	8.0	- 9.28
	9.0	- 6.20
	10.0	- 3.63
	11.0	- 1.65
	12.0	0.36
	13.0	1.96
	14.0	3.34
	15.0	4.93

TABLA B4

ESFUERZO CORTANTE CORREGIDO VS. RAPIDEZ DE CORTE.

$\gamma \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	$\sigma_w \text{ lb/ft}^2$
0.5	3.426
0.7	3.543
0.9	3.840
1.0	3.939
2.0	5.480
3.0	6.961
4.0	8.446
5.0	9.934
6.0	11.420
8.0	14.392
9.0	15.878
10.0	17.364
11.0	18.836
12.0	20.335
13.0	21.822
14.0	23.306
15.0	24.831



GRAFICA B 3

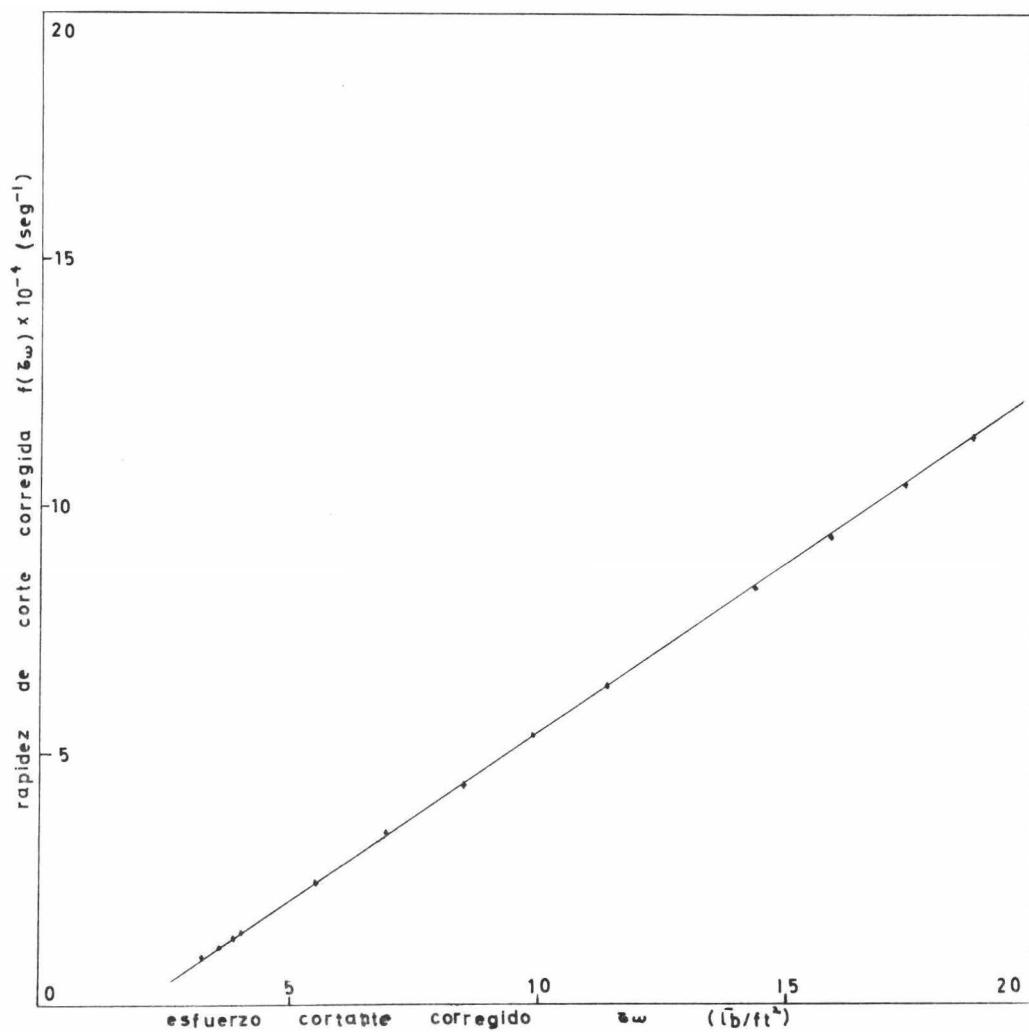
SOLUCION: 1.5 % CMC.

rapidez de corte vs.
esfuerzo cortante corregido.

TABLA B5

RAPIDEZ DE CORTE CORREGIDA.

$\zeta\omega$	\bar{b}/ft^2	$\frac{\zeta\omega}{4}$	\bar{b}/ft^2	$\dot{\gamma} \times 10^{-4}$ seg^{-1}	$\frac{3}{4} \dot{\gamma} \times 10^{-4}$ seg^{-1}	$\frac{d\dot{\gamma}}{d\zeta\omega} \times 10^{-4}$	$f(\zeta\omega) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$
3.246	0.611	0.5	0.5	0.375	0.68	"	0.926
3.543	0.865	0.7	0.7	0.525	"	"	1.126
3.840	0.960	0.9	0.9	0.675	"	"	1.328
3.989	0.997	1.0	1.0	0.75	"	"	1.428
5.480	1.370	2.0	2.0	1.50	"	"	2.431
6.961	1.760	3.0	3.0	2.25	"	"	3.433
8.446	2.111	4.0	4.0	3.0	"	"	4.435
9.934	2.483	5.0	5.0	3.75	"	"	5.438
11.420	2.885	6.0	6.0	4.50	"	"	6.441
14.392	3.598	8.0	8.0	6.00	"	"	8.446
15.378	3.969	9.0	9.0	6.75	"	"	9.449
17.364	4.431	10.0	10.0	7.50	"	"	10.452
18.336	4.709	11.0	11.0	8.25	"	"	11.452
20.335	5.063	12.0	12.0	9.00	"	"	12.456
21.382	5.445	13.0	13.0	9.75	"	"	13.459
23.306	5.826	14.0	14.0	10.50	"	"	14.461
24.831	6.208	15.0	15.0	11.25	"	"	15.471

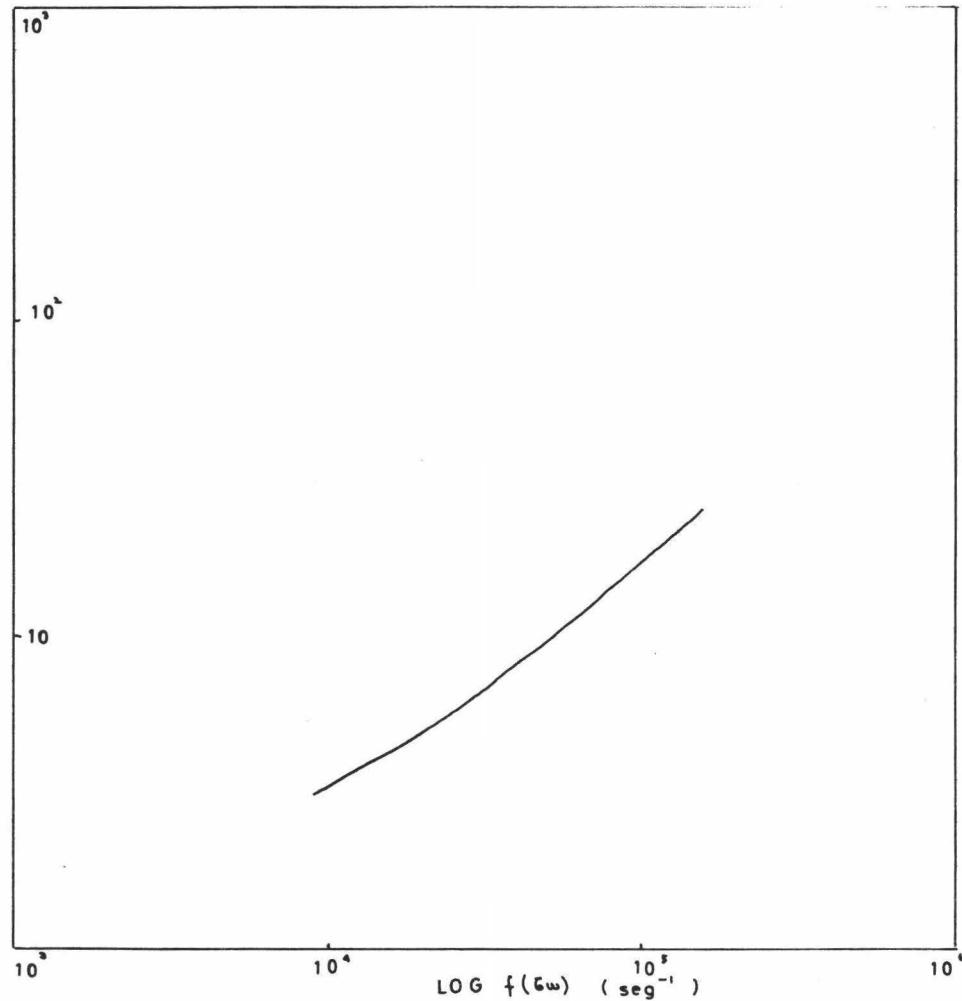


GRAFICA B4

SOLUCION: 1.5 % CMC,
curva de flujo.

TABLA B6
VISCOSIDAD.

$\bar{b}\omega$	\bar{b}/ft^2	$f(\bar{b}\omega) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	η	$c\rho$
3.246		0.926		16.79
3.543		1.126		15.07
3.840		1.328		13.82
3.989		1.428		13.38
5.480		2.431		10.80
6.961		3.453		9.71
8.446		4.435		9.12
9.934		5.438		8.75
11.420		6.441		8.49
14.392		8.446		8.16
15.878		9.449		8.05
17.364		10.452		7.96
18.836		11.452		7.88
20.335		12.456		7.82
21.822		13.459		7.76
23.306		14.461		7.72
24.831		15.471		7.68



GRAFICA B5

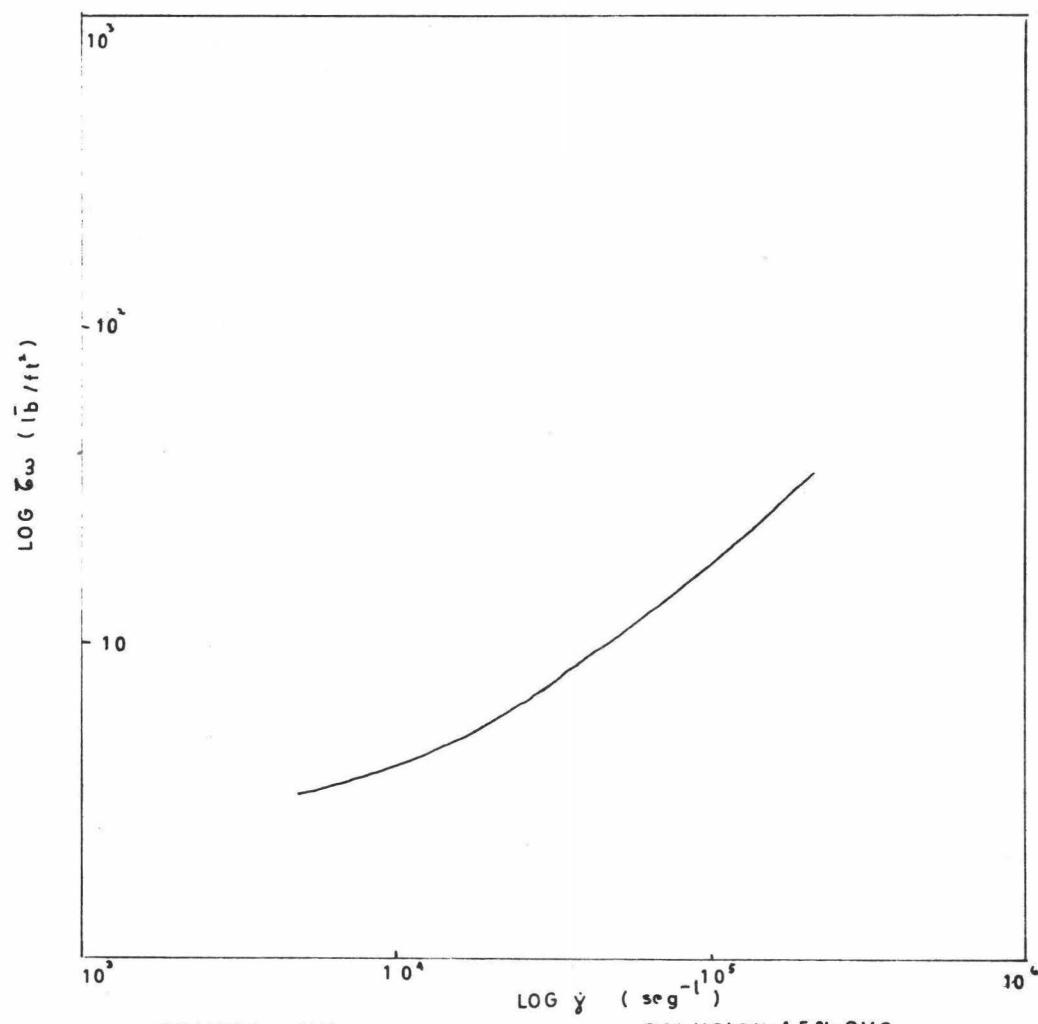
SOLUCION: 1.5% CMC.

Ley de la Potencia.

TABLA B7

ESFUERZO CORRIENTE CORREGIDO.

$\frac{d\Delta P}{d\Delta D}$	$\dot{\gamma} \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	$\zeta \omega$	\bar{t}_6 / ft^2
13.21	0.5	3.302	
14.42	0.7	3.605	
15.63	0.9	3.907	
16.84	1.0	4.06	
12.35	2.0	5.587	
28.35	3.0	7.087	
34.43	4.0	8.602	
40.53	5.0	10.117	
46.63	6.0	11.632	
52.65	3.0	14.662	
64.70	9.0	16.175	
70.76	10.0	17.690	
76.54	11.0	19.135	
82.88	12.0	20.720	
88.94	13.0	22.235	
94.94	14.0	23.747	
101.32	15.0	25.330	



GRAFICA B 7

SOLUCION: 1.5% CMC.

Calculo de n' .

TABLA B8

CALCULO a n°.

$\dot{\gamma} \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	n'	$\frac{3n' + 1}{4n'}$	$f(\zeta\omega) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$
0.5	0.3	1.583	0.791
0.7	"	"	1.103
0.9	"	"	1.424
1.0	"	"	1.583
2.0	0.565	1.192	2.334
3.0	"	"	3.575
4.0	0.778	1.071	5.355
5.0	"	"	6.426
6.0	"	"	8.568
8.0	"	"	9.639
9.0	"	"	10.710
10.0	"	"	11.781
11.0	"	"	12.852
12.0	"	"	13.923
13.0	"	"	14.994
14.0	"	"	15.438
15.0	"	"	16.065

TABLA B9 Y TABLA B10.

VISCOSIDADES.

$\zeta\omega$	\bar{b}/ft^2	$f(\zeta\omega) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	η	cp.
3.302		0.791		19.99
3.605		1.108		15.59
3.907		1.424		13.14
4.060		1.583		12.28
5.587		2.384		11.22
7.237		3.576		9.62
8.602		4.291		9.49
10.117		5.355		9.05
11.632		6.426		8.67
14.662		8.568		8.20
16.175		9.639		8.04
17.690		10.710		7.91
19.135		11.781		7.78
20.720		12.852		7.72
22.355		13.923		7.65
23.747		14.994		7.59
25.320		16.065		7.55

TABLA C1

CONTRACCION. MANGA CIRCULAR.

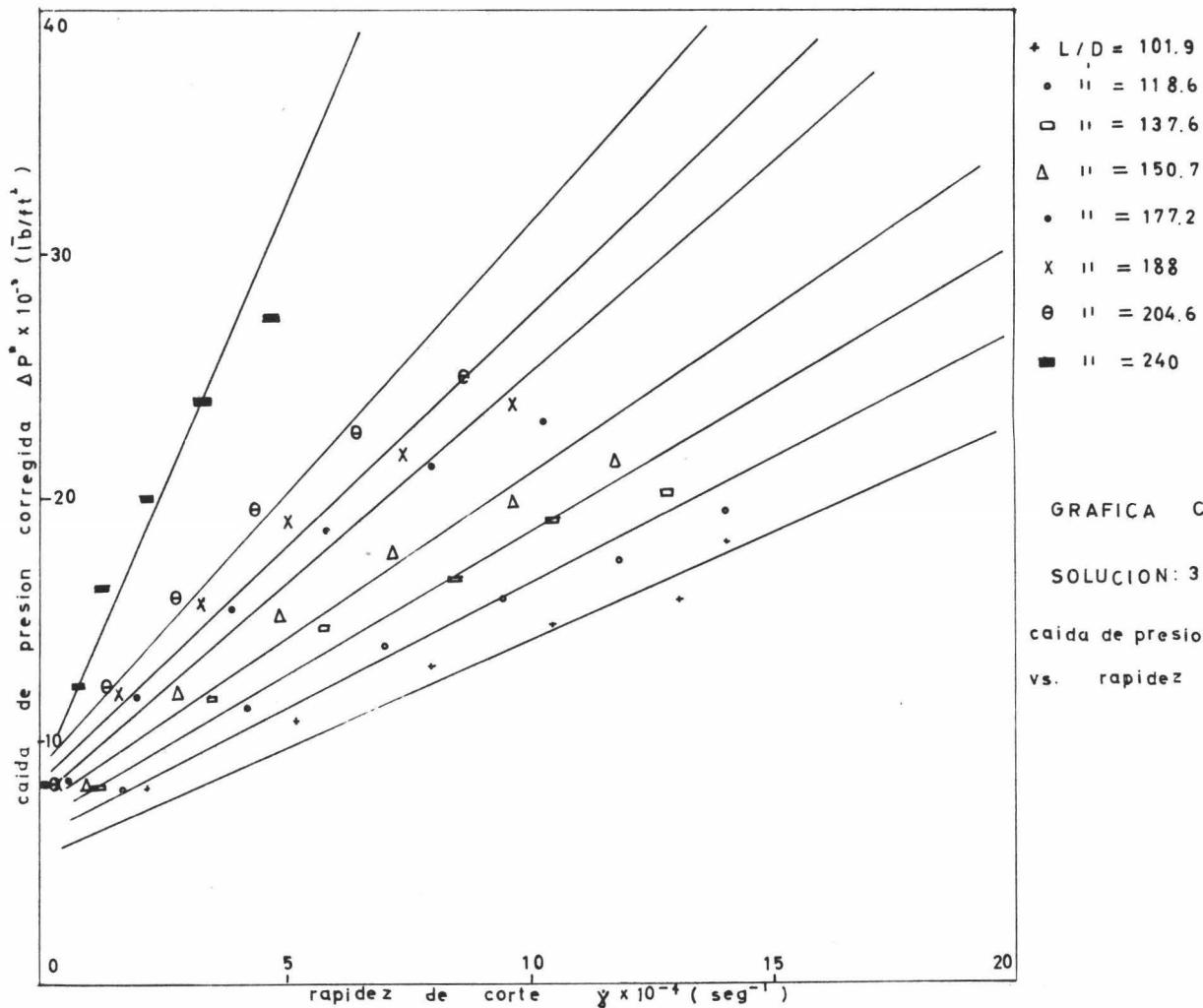
SOLUCION 3.0. CAC.

DENSIDAD: 1.014 g/cm³.

L/D	ΔP \bar{t}_b /ft ²	$Q \times 10^4$ ft ³ /seg	v ft/seg	ΔP^* \bar{t}_b /ft ²	$g \times 10^{-4}$ seg ⁻¹
101.9	4095.36	0.226	2.00	4036.360	0.133
	8190.72	1.197	18.59	7938.237	2.2158
	12236.03	2.339	25.12	10865.358	5.526
	16381.44	4.353	38.52	13042.514	8.958
	20476.80	5.689	50.34	14773.878	10.531
	24572.16	7.071	66.57	15761.930	12.089
	28667.52	7.687	68.02	18255.395	14.359
113.6		0.153	1.35	4092.280	0.244
		0.915	8.09	8043.194	1.694
		2.324	20.56	11334.235	3.302
		3.907	33.69	13327.614	7.047
		5.126	45.36	15646.731	9.322
		5.420	56.81	17.69.501	11.174
		7.6.1	61.253	19377.461	14.106
137.6		0.132	1.17	4092.280	0.244
		0.657	5.76	8116.111	1.204
		1.340	16.28	11639.511	3.407
		3.118	27.52	14667.360	5.771
		4.635	41.01	16691.284	8.530
		5.525	49.51	18356.172	11.353
		6.963	51.62	20124.363	12.339

160.7		0.33	0.69	4094.026	0.161
		0.503	1.62	8142.706	0.966
		1.320	13.65	11372.970	2.315
		2.641	31.37	15152.111	4.989
		3.918	31.67	17771.860	7.253
		5.253	46.21	19746.830	9.688
		6.375	56.41	21506.317	11.800
177.2		0.076	0.17	4094.328	0.1417
		0.348	3.08	8169.380	0.644
		1.047	9.26	12092.920	1.938
		2.070	18.31	15626.407	3.832
		3.215	28.45	18655.475	5.951
		4.346	38.46	21243.994	8.045
		5.588	49.45	23165.295	10.345
183		0.0696	0.616	4094.506	0.128
		0.313	2.77	8173.457	0.579
		0.83	7.72	12151.787	1.617
		1.764	15.61	15.833.165	3.265
		2.759	24.41	19135.491	5.108
		4.026	35.63	21716.062	7.453
		5.251	46.47	23308.937	9.720

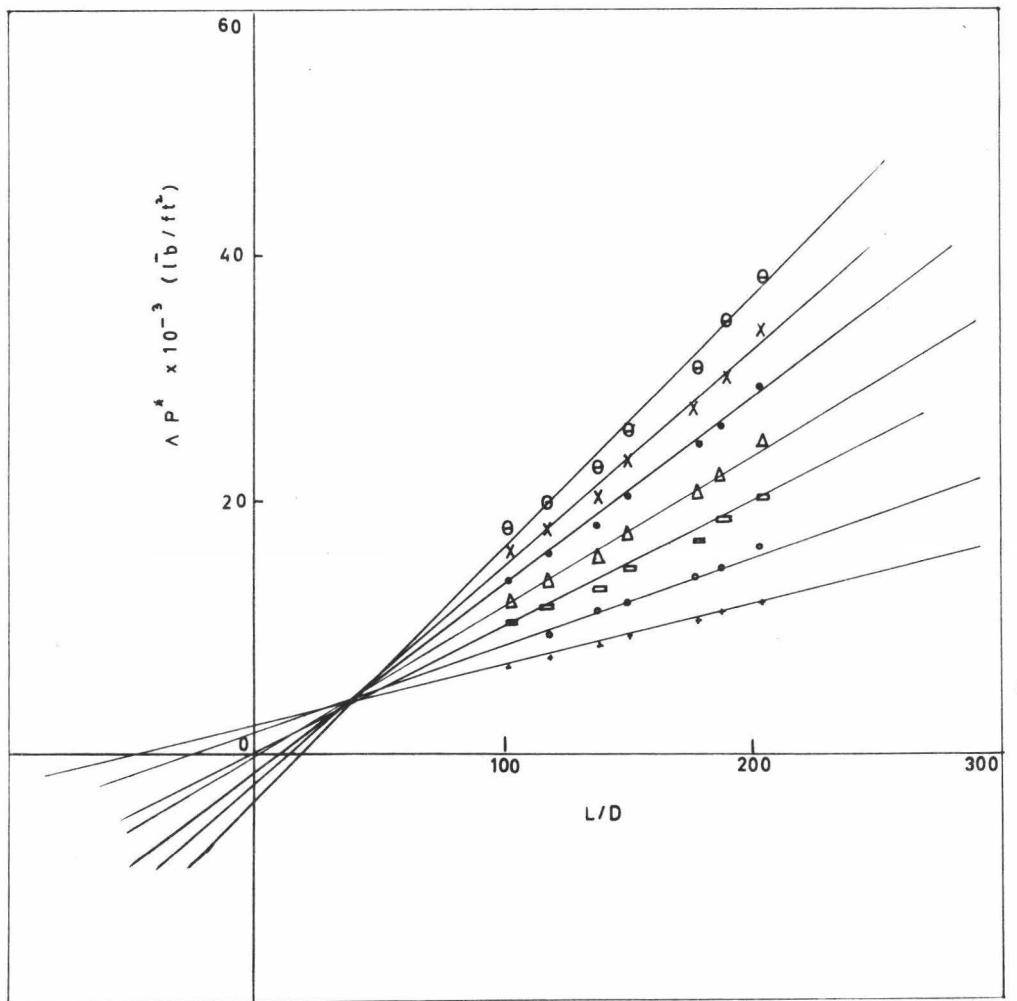
204.6		0.6591	0.523	4094.7444	0.1095
		0.261	2.31	3178.716	0.483
		0.73	6.49	14191.14	1.359
		1.503	13.5	15983.385	2.782
		2.380	21.06	18148.688	4.406
		3.514	31.09	22396.310	6.506
		4.739	41.94	24710.220	8.773



GRAFICA C1

SOLUCION: 3% C.M.C.

caida de presion corregida
vs. rapidez de corte.



GRAFICA C 2

SOLUCION: 3 % CMC.

caida de presion corregida

v s. L/D .

TABLA C3

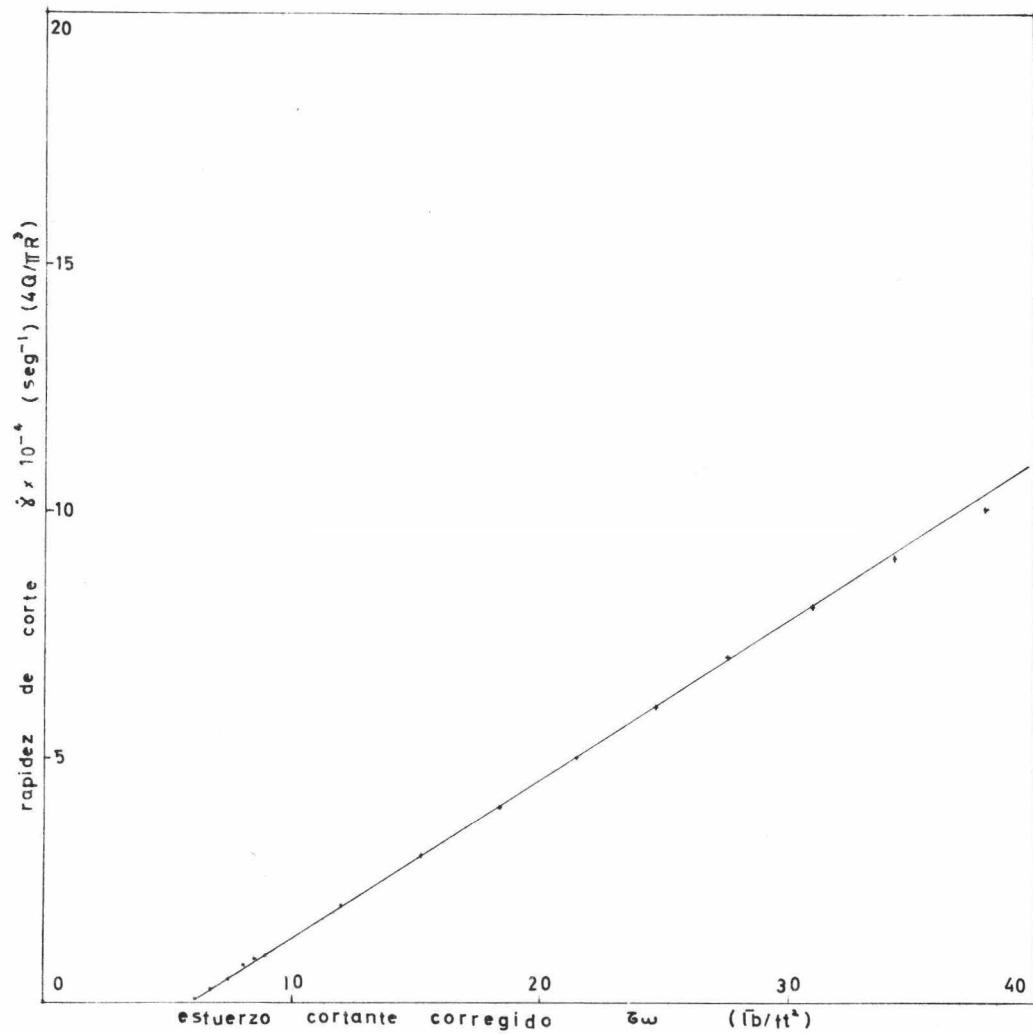
FACTOR DE CORRECCION.

	$\gamma \times 10^{-4}$	n
	0.05	-123.61
	0.07	-121.89
	0.09	-120.22
	0.1	-119.36
	0.3	-104.34
	0.5	- 91.95
	0.7	- 81.50
	0.9	- 75.58
3.0% CMC.	1	- 68.62
	2	- 40.42
	3	- 23.94
	4	- 13.13
	5	- 5.50
	6	0.165
	7	4.55
	8	8.02
	9	12.42
	10	16.64
	12	16.94
	13	18.44
	14	19.70
	15	20.83

TABLA C4

ESFUERZO CORTANTE CORREGIDO VS. RAPIDEZ DE CORTE.

$\dot{\gamma} \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	$\tau_w \text{ lb/ft}^2$
0.05	5.922
0.07	5.986
0.09	6.049
0.1	6.081
0.3	6.714
0.5	7.346
0.7	7.978
0.9	8.510
1	8.928
2	12.082
3	15.233
4	18.382
5	21.539
6	24.673
7	27.819
8	30.958
9	34.421
10	38.034
12	43.530
13	46.680
14	49.814
15	52.952



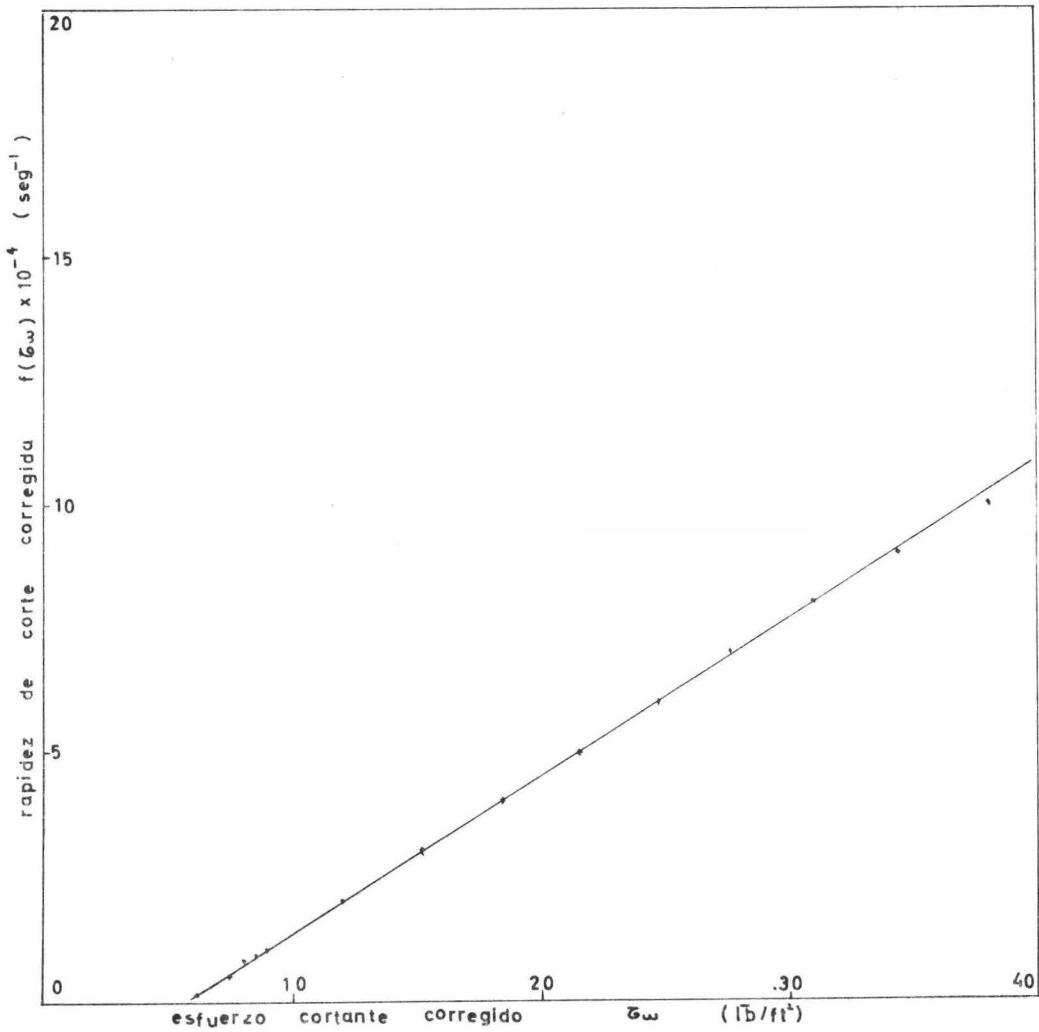
GRAFICA C 3

SOLUCION: 3% CMC,
rapidez de corte vs.
esfuerzo cortante corregido.

TABLA C5

TABLA C5
RAPIDEZ DE CORTE CALCULADA.

$\bar{\omega}$ \bar{b}/ft^2	$\frac{\bar{\omega}}{4}$ \bar{b}/ft^2	$\dot{\gamma} \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	$\frac{3}{4} \dot{\gamma} \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	$\frac{d \dot{\gamma}}{d \bar{\omega}}$	$f(\bar{\omega}) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$
5.922	1.430	0.05	0.0375	0.3166	0.506
5.986	1.496	0.07	0.0525	"	0.526
6.049	1.512	0.09	0.0675	"	0.546
6.081	1.520	0.1	0.075	"	0.556
6.714	1.578	0.3	0.225	"	0.756
7.346	1.836	0.5	0.375	"	0.956
7.978	1.994	0.7	0.525	"	1.156
8.510	2.127	0.9	0.675	"	1.348
8.924	2.232	1	0.75	"	1.456
12.032	3.020	2	1.50	"	2.456
15.233	3.808	3	2.25	"	3.455
18.382	4.595	4	3	"	4.455
21.529	5.382	5	3.75	"	5.454
24.673	6.168	6	4.50	"	6.452
27.819	6.954	7	5.25	"	7.337
30.958	7.739	8	6.00	"	8.450
34.421	8.605	9	6.75	"	9.474
38.034	9.518	10	7.50	"	10.510
43.530	10.882	12	9.00	"	12.445
46.630	11.667	13	9.75	"	13.444
49.814	12.453	14	10.50	"	14.442
52.952	13.238	15	11.25	"	15.441



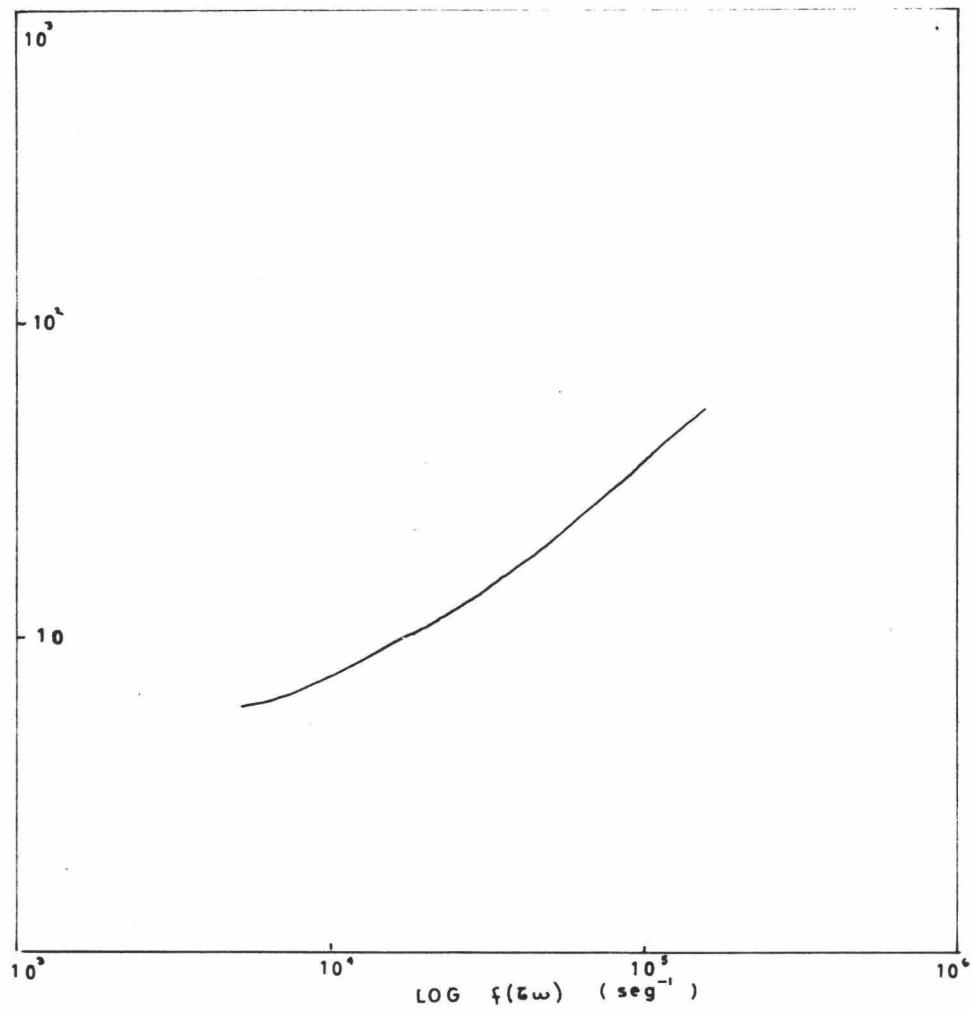
GRAFICA C 4

SOLUCION: 3% CMC
curva de flujo.

TABLA C6

VISCOSIDAD.

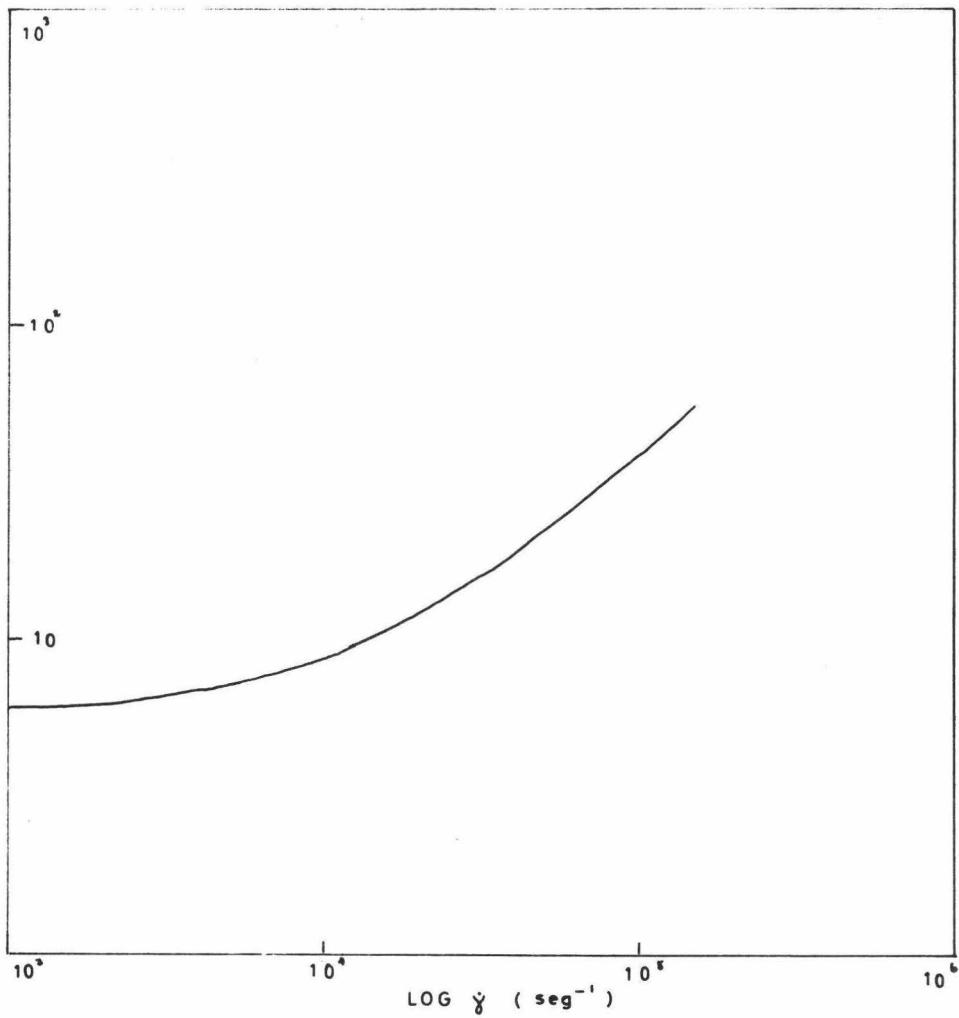
τ_ω	lb/ft^2	$f(\tau_\omega) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	η	cp.
5.922		0.506	56.07	
5.986		0.526	54.52	
6.049		0.546	53.08	
6.081		0.556	52.40	
6.714		0.756	42.55	
7.346		0.956	36.81	
7.978		1.156	33.06	
8.510		1.348	30.24	
8.928		1.456	29.38	
12.082		2.456	23.57	
15.233		3.455	21.12	
18.382		4.455	19.77	
21.539		5.454	18.91	
24.673		6.452	18.23	
27.819		7.337	18.16	
30.958		8.450	17.55	
34.421		9.474	17.40	
38.034		10.510	17.34	
43.530		12.445	16.75	
46.680		13.444	16.63	
49.314		14.442	16.52	
52.952		15.441	16.43	



GRAFICA C 5

SOLUCION: 3% CMC.

Ley de la Potencia.



GRAFICA C7

SOLUCION: 3% CMC.

Calculo de n' .

TABLA 33

CALCULO DE n^1 .

$\gamma \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	n^1	$\frac{3n^1 + 1}{4n^1}$	$f(5\omega) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$
0.05	0.106	3.103	0.155
0.07	"	"	0.217
0.09	"	"	0.279
0.1	"	"	0.311
0.3	0.168	2.238	0.671
0.5	"	"	1.119
0.7	0.293	1.603	1.122
0.9	"	"	1.446
1	0.315	1.416	1.482
2	0.580	1.180	2.360
3	0.808	1.059	3.177
4	"	"	4.236
5	"	"	5.295
6	"	"	6.354
7	"	"	7.413
8	"	"	8.472
9	"	"	9.531
10	"	"	10.590
12	"	"	12.708
13	"	"	13.767
14	"	"	14.826
15	"	"	15.885

TABLA C9 Y TABLA C10.

VISCOSIDAD.

\bar{G}_w	\bar{b}/ft^2	$f(\bar{G}_w) \times 10^{-4} \text{ sag}^{-1}$	η	CP-
5.95		0.155	183.44	
6.015		0.219	132.80	
6.077		0.279	104.35	
6.110		0.311	94.18	
6.752		0.671	48.21	
7.392		1.119	33.65	
8.035		1.122	34.31	
8.677		1.416	30.36	
8.997		1.442	29.89	
12.205		2.36	24.77	
15.415		3.177	23.24	
18.622		4.236	21.06	
21.832		5.295	19.75	
25.04		6.354	18.88	
28.25		7.413	18.26	
31.45		8.472	17.79	
34.915		9.351	17.62	
38.527		10.590	17.47	
44.292		12.708	16.69	
47.51		13.767	16.53	
50.71		14.826	16.38	
53.92		15.885	16.26	

TABLA A1

CONDUCTOR: ENERGIA CINETICA.

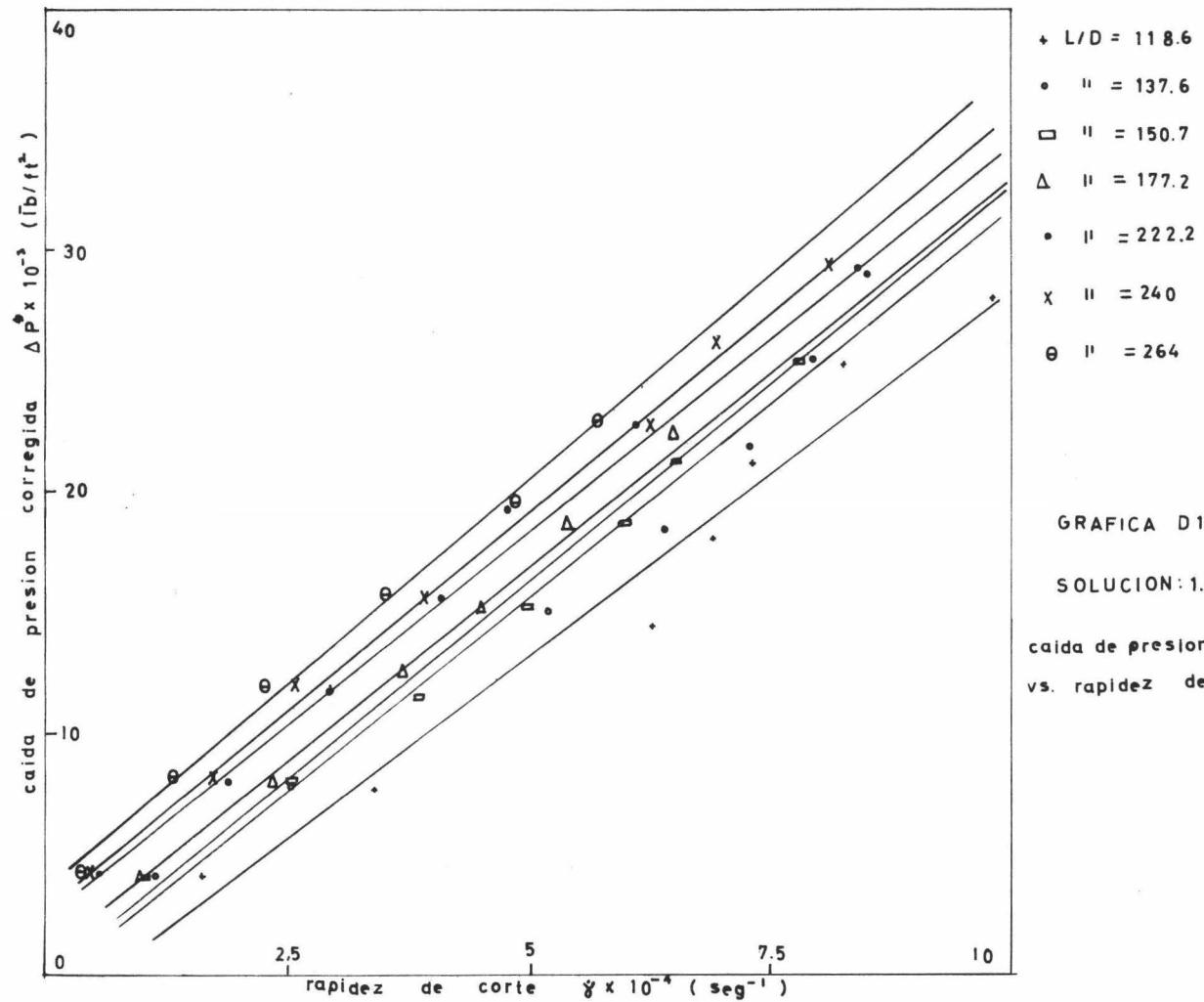
SOLUCION 1.5% FOLIO X

PENSILIDAD: 1.006 g/cm³.

L/D	ΔP lb/ft ²	Q ft ³ /seg $\times 10^4$	ω ft/seg	$\Delta P''$ lb/ft ²	\dot{V} seg ⁻¹ $\times 10^{-4}$
118.6	4095.36	0.856	7.57	3970.43	1.58
	8190.72	1.32	16.1	7625.64	3.37
	16381.44	3.38	29.91	14,431.20	6.25
	20,476.8	3.72	32.92	1811.27	6.88
	24,572.16	3.93	34.77	21936.64	7.27
	28667.52	4.47	39.55	25257.56	8.27
	32762.88	5.30	46.90	27967.73	9.80
137.6		0.624	5.52	4029.93	1.15
		1.39	12.3	7860.90	2.57
		1.99	17.6	11610.8	3.68
		2.81	24.86	15034.16	5.19
		3.47	30.70	18422.17	6.42
		3.93	34.78	21935.12	7.27
		4.27	37.78	25555.94	7.90
		4.60	40.70	29,151.73	8.51
150.7		0.616	5.15	4030.6	1.14
		1.37	12.12	7870.5	2.53
		2.10	18.58	11533.5	3.60
		2.71	23.98	15127.35	5.01
		3.25	28.76	18673.64	6.01
		3.50	30.97	22481.23	6.47
		4.22	37.34	25628.0	7.90

		0.59	5.22	4025.95	0.965
		1.27	11.24	7915.3	2.35
177.1		2.14	21.6	15364.34	4.51
		3.19	28.23	18739.48	5.90
		3.51	31.06	22469.06	6.49
		0.294	2.6	4080.62	0.54
		1.036	9.17	8007.4	1.91
222.2		1.60	14.16	11348.98	2.96
		2.23	19.73	15532.32	4.12
		2.60	23.0	19323.53	4.81
		3.31	29.29	22701.93	6.12
		4.53	40.0	29274.88	8.38
		0.283	2.5	4081.73	0.52
		0.945	8.36	8032.36	1.75
230		1.393	12.32	11955.19	2.57
		2.114	18.70	15619.11	3.91
		3.37	29.82	22633.63	6.23
		3.75	33.18	26267.53	6.93
		4.38	38.76	29487.78	8.10

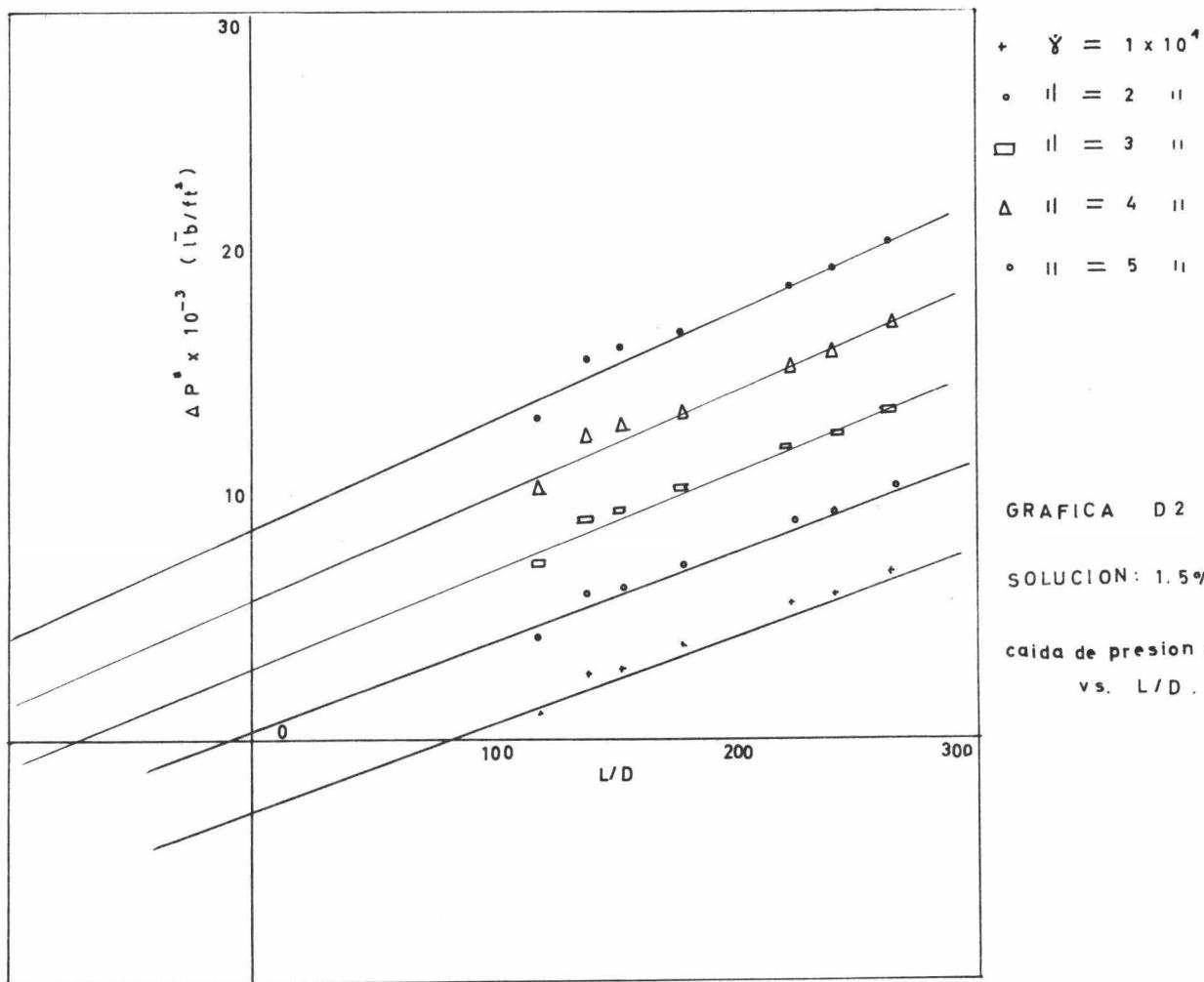
264		0.238	2.1	4085.74	0.44
		0.714	6.3	8104.19	1.32
		1.22	10.8	12031.80	2.26
		1.88	16.63	15773.54	3.48
		2.618	23.17	19306.47	4.84
		3.08	27.25	22953.37	5.7



GRAFICA D1

SOLUCION: 1.5% POLIOX.

caida de presion corregida
vs. rapidez de corte.



GRAFICA D 2

SOLUCION: 1.5% POLIOX.

caida de presion corregida
v.s. L/D .

TABLA D3

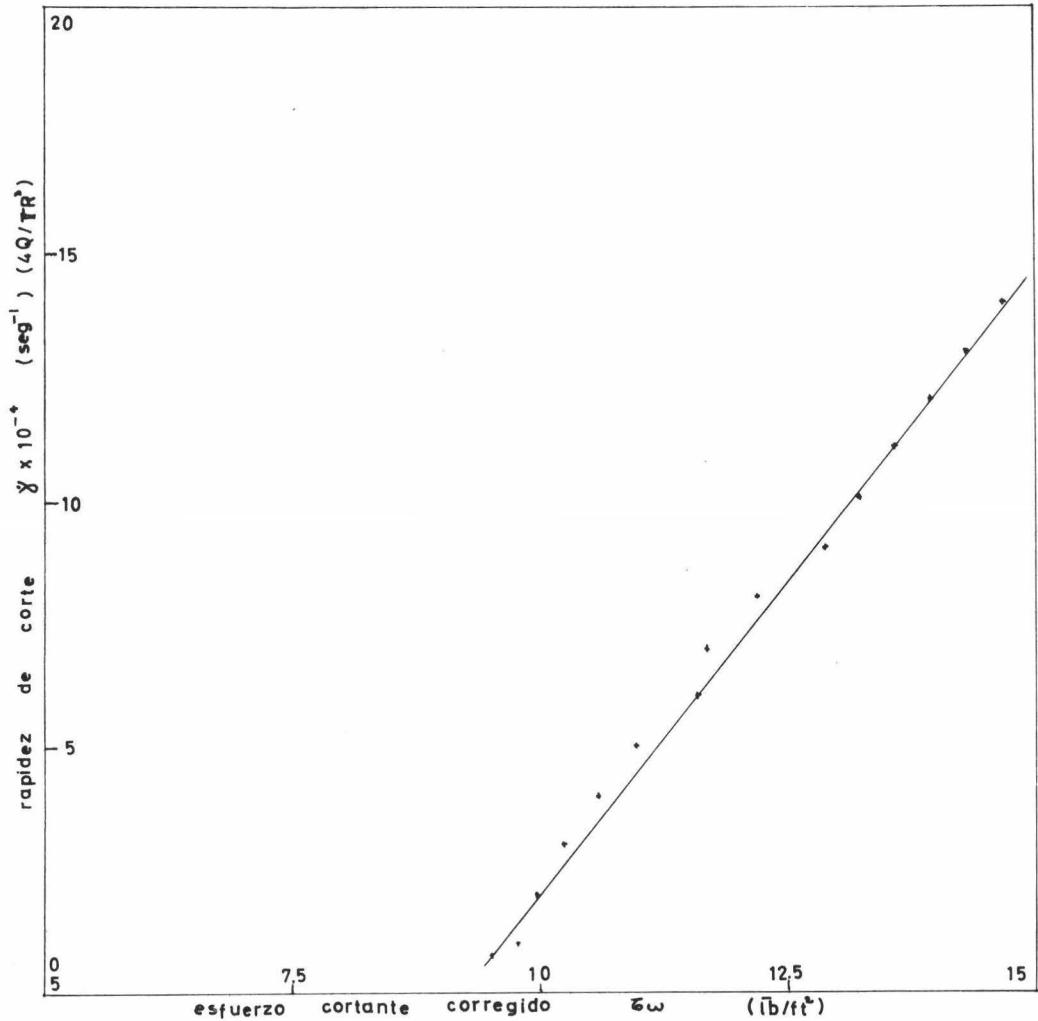
FACTOR DE CORRECION .

	$\gamma \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	n
1.5~ POLIOX	1	78.539
	2	1.143
	3	74.671
	4	142.742
	5	206.036
	6	254.044
	7	319.564
	8	366.703
	9	418.944
	10	464.102
	11	506.475
	12	546.626
	13	584.319
	14	620.205
	15	653.958

TABLA D4

ESFUERZO CONTANTE CORREGIDO VS. RATIOES DE CORTE.

$\dot{\gamma} \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	σ_w	lb/ft^2
1		9.783
2		9.948
3		10.253
4		10.598
5		10.958
6		11.014
7		11.708
8		12.180
9		12.887
10		13.242
11		13.602
12		13.963
13		14.333
14		14.706
15		15.417



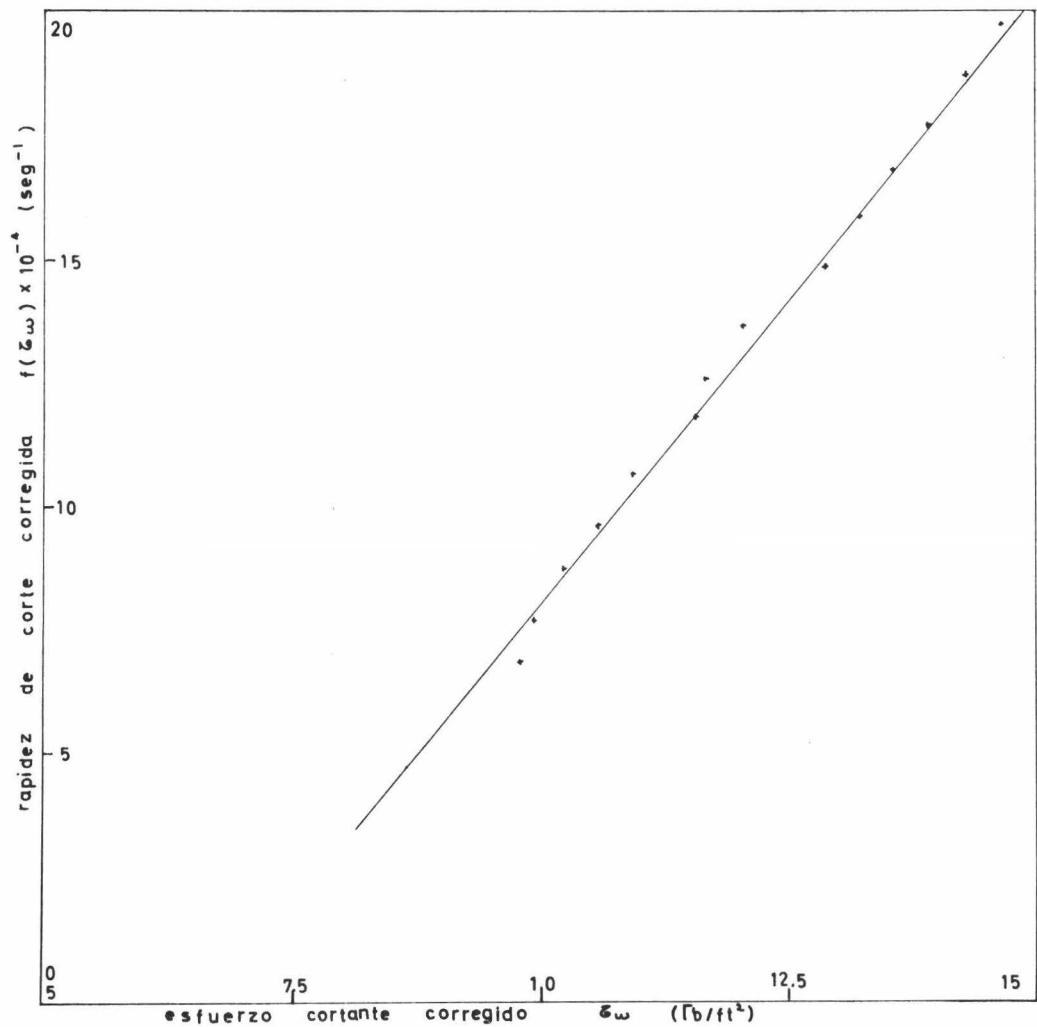
GRAFICA D 3

SOLUCION: 1.5% POLIOX.
 rapidez de corte vs.
 esfuerzo cortante corregido.

TABLA D5

RAPIDEZ DE CORTE CORREGIDA.

$\bar{\epsilon}_w \bar{t}_b / ft^2$	$\frac{\bar{\epsilon}_w}{4} \bar{t}_b / ft^2$	$\dot{\gamma} \times 10^4 \text{ seg}^{-1}$	$3/4 \dot{\gamma} \times 10^4 \text{ seg}^{-1}$	$\frac{d \dot{\gamma}}{d \bar{\epsilon}_w}$	$f(\bar{\epsilon}_w) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$
9.788	2.447	1	0.75	2.5	6.367
9.948	2.487	2	1.5	"	7.717
10.253	2.563	3	2.25	"	8.652
10.598	2.649	4	3.0	"	9.623
10.958	2.739	5	3.75	"	10.599
11.614	2.903	6	4.5	"	11.759
11.708	2.927	7	5.25	"	12.567
12.180	3.045	8	6.0	"	13.612
12.887	3.222	9	6.75	"	14.804
13.242	3.310	10	7.5	"	15.776
13.602	3.400	11	8.25	"	16.751
13.963	3.491	12	9.0	"	17.727
14.333	3.583	13	9.75	"	18.708
14.706	3.676	14	10.5	"	19.691
15.417	3.854	15	11.25	"	20.885



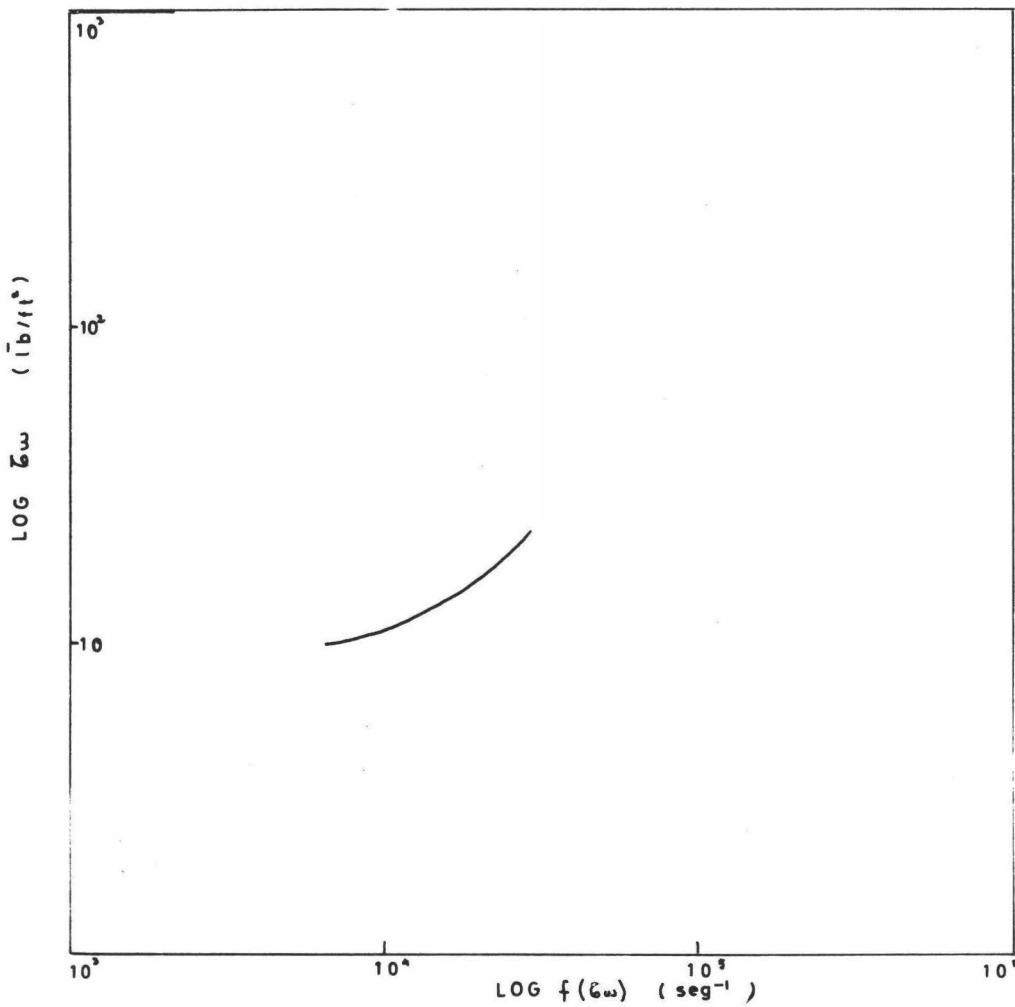
GRAFICA D4

SOLUCION: 1.5% POLIOX.

curva de flujo.

TABLA D6
VISCOSIDAD

$\tau \omega$	\bar{b}/ft^2	$f(\tau\omega) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	η	c_P
9.788		6.367	6.33	
9.948		7.717	6.17	
10.253		8.658	5.67	
10.598		9.623	5.27	
10.958		10.599	4.95	
11.614		11.759	4.73	
11.708		12.567	4.16	
12.180		13.612	4.29	
12.887		14.804	4.17	
13.242		15.776	4.02	
13.602		16.751	3.89	
13.963		17.727	3.77	
14.333		18.703	3.67	
14.706		19.691	3.58	
15.417		20.885	3.53	



GRAFICA D 5

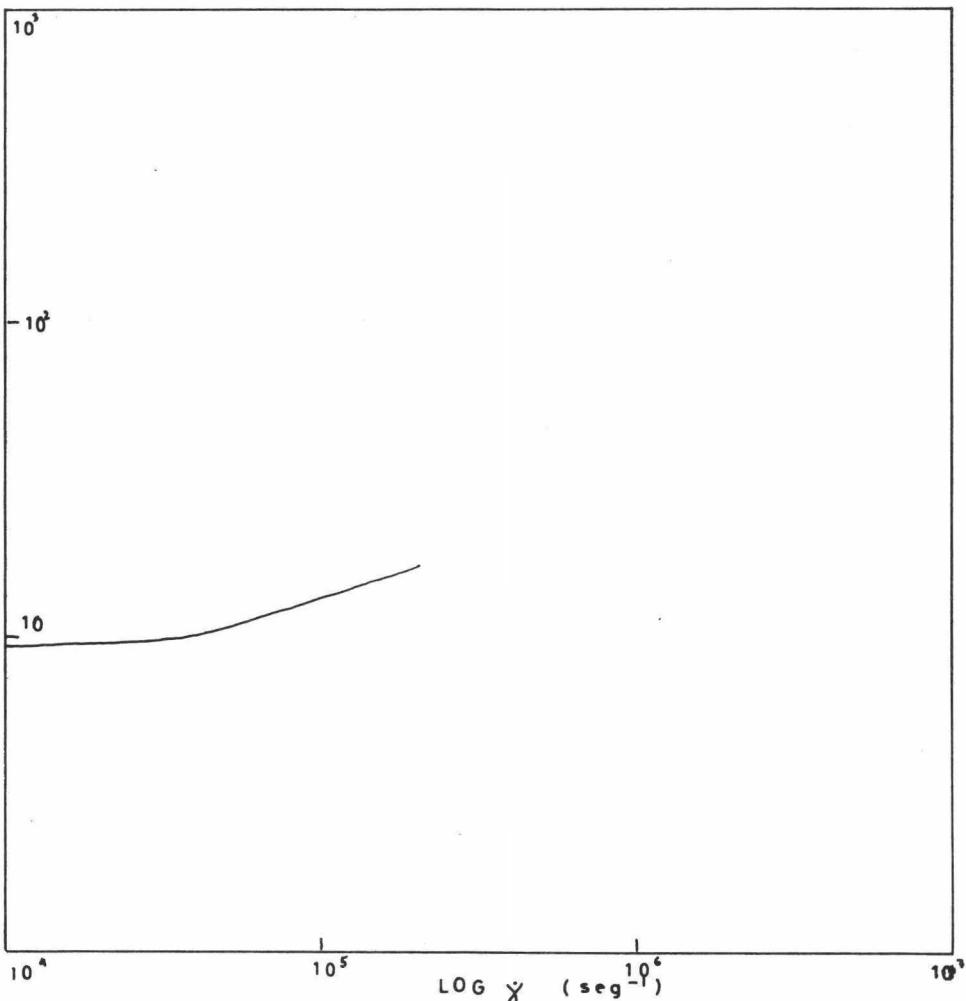
SOLUCION: 1.5 % POLIOX.

Ley de la Potencia.

TALLA D7

TIPO DE CONTAMINANTE CORREGIDO

$\dot{\gamma} \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$	$\frac{d \Delta P}{d \Delta D}$	$\tau_w \text{ lb/ft}^2$
1	37.45	9.362
2	39.02	9.755
3	40.59	10.147
4	42.16	10.51
5	43.72	10.93
6	46.31	11.57
7	46.87	11.717
8	48.69	12.172
9	50.01	12.502
10	51.58	12.895
11	53.16	13.29
12	54.72	13.68
13	56.30	14.075
14	57.86	14.465
15	59.44	14.86



GRAFICA D 7

SOLUCION: 1.5% POLIOX.

Calculo de n' .

TABLA D8

CALCULO DE n^i .

$\dot{\gamma} \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	n^i	$\frac{3n^i + 1}{4n^i}$	$f(6\omega) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$
1	0.0628	4.731	4.731
2	0.134	2.615	5.230
3	0.1875	2.083	6.249
4	0.1875	2.083	8.33
5	0.3125	1.55	7.75
6	"	"	9.30
7	"	"	10.85
8	"	"	12.40
9	"	"	13.95
10	"	"	15.50
11	"	"	17.05
12	"	"	18.6
13	"	"	20.15
14	"	"	21.7
15	"	"	23.25

CABLA D9 Y D10

VISCOSIDAD

$\zeta \omega$	\bar{t}_b / ft^2	$f(\zeta \omega) \times 10^4 \text{ seg}^{-1}$	η	c.p.
9.362		4.731		9.48
9.755		5.23		8.94
10.147		6.249		7.78
10.54		7.33		6.062
10.93		7.75		6.75
11.32		9.30		5.96
11.717		10.85		5.17
12.172		12.40		4.70
12.502		13.95		4.29
12.895		15.50		3.98
13.290		17.05		3.73
13.680		18.60		3.52
14.075		20.15		3.35
14.465		21.70		3.19
14.860		23.25		3.06

TABLA 1

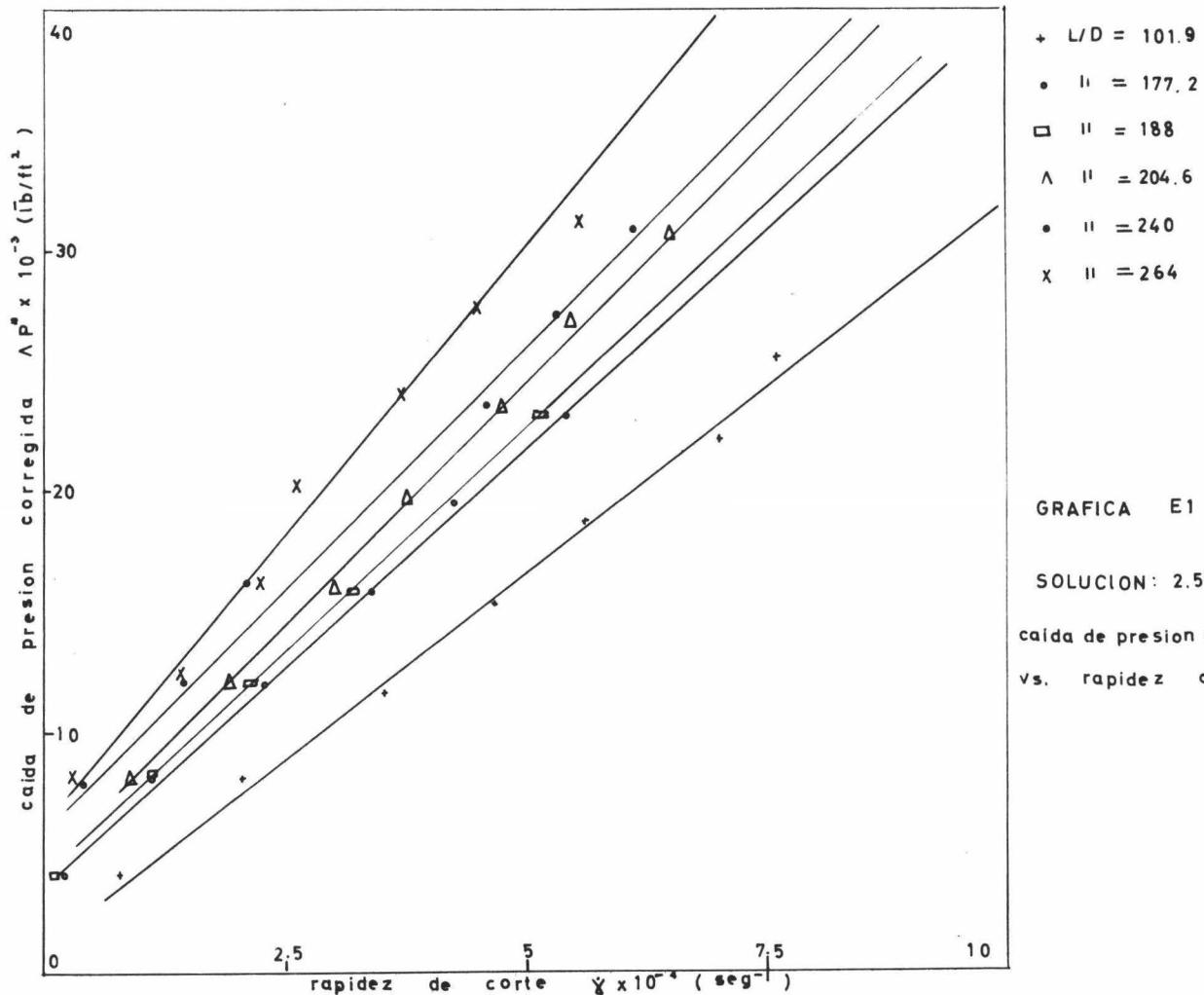
CORRECCION ENERGIA CRISTICA.

SOLUCION 2.5% POLIOX.

DENSIDAD: 1.01 g/cm³.

L/D	$\Delta P \bar{t}b/\text{ft}^2$	$Q \text{ ft}^3/\text{seg} \times 10^4$	$\tau \text{ ft/seg}$	$\Delta P^* \bar{t}b/\text{ft}^2$	$\gamma \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$
101.9	4095.36	0.349	3.09	4074.54	0.73
	8190.72	1.108	9.80	7981.35	2.05
	12286.08	1.89	16.72	11676.64	3.49
	16381.44	2.51	22.21	15306.08	4.64
	20476.80	3.31	29.29	18606.57	6.12
	24572.16	3.77	33.36	22146.06	6.97
	28667.52	4.12	36.46	25769.58	7.62
177.2		0.126	1.11	4092.65	0.233
		0.67	5.93	8114.08	1.24
		1.33	11.77	11984.08	2.46
		1.75	15.48	15858.60	3.21
		2.07	18.32	19745.26	3.83
		2.40	21.24	23588.78	4.44
188		2.95	26.10	27,181.78	5.46
		0.094	0.83	4093.85	0.174
		0.604	5.34	8128.55	1.11
		1.23	10.88	12028.02	2.27
		1.85	16.37	15797.25	3.42
		2.28	20.17	19589.91	4.22
		2.95	26.10	23087.12	5.46

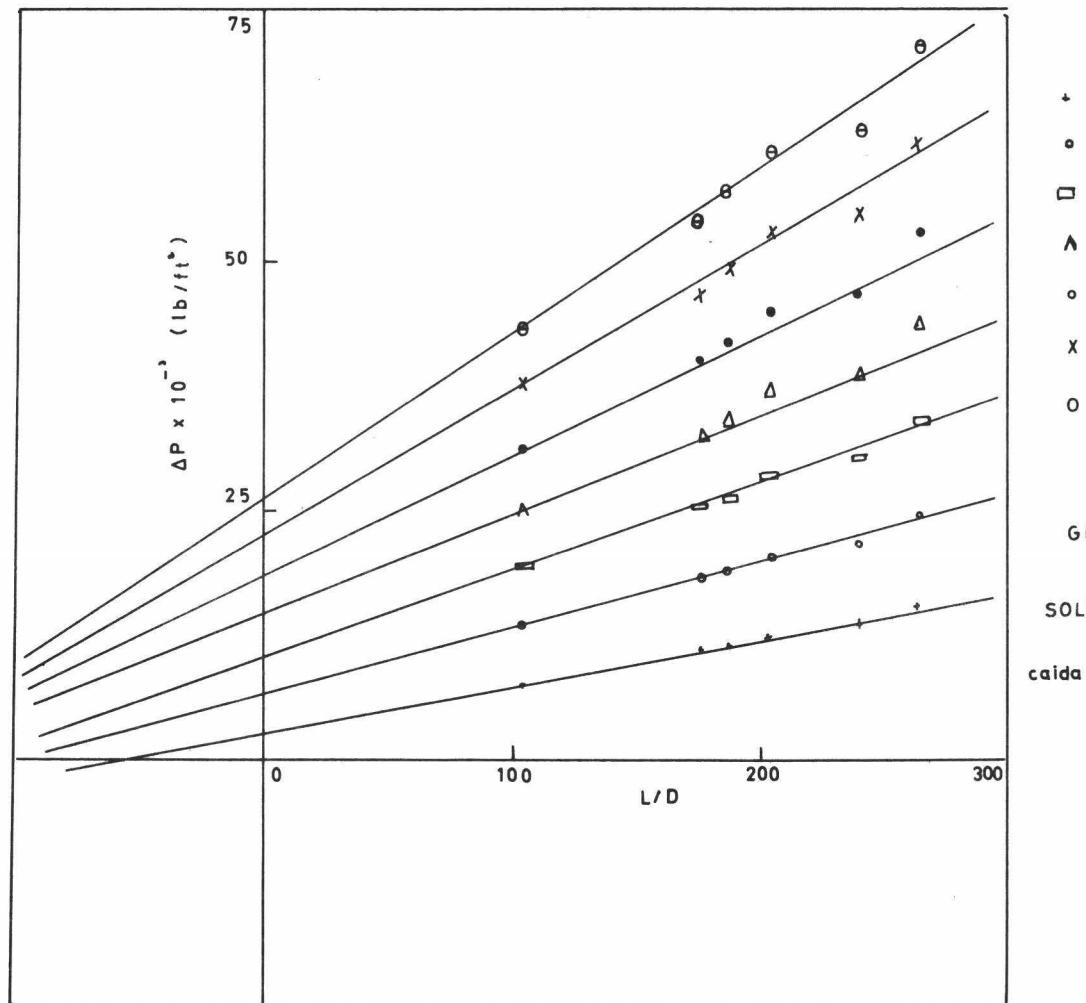
20.6		0.087	0.77	4094.07	0.161
		0.58	5.13	8133.35	1.073
		1.17	10.35	12052.55	2.16
		1.72	15.22	15,876.45	3.18
		2.79	24.69	23243.24	5.16
24.0		0.059	0.522	4094.76	0.109
		0.458	4.05	8154.96	0.847
		1.04	9.20	12101.56	1.92
		1.62	14.33	15933.78	2.99
		2.01	17.78	19787.64	3.72
		2.58	22.83	23435.93	4.77
		2.96	26.19	27172.22	5.47
		3.51	31.06	30659.78	6.49
26.4		0.042	0.37	4095.06	0.077
		0.32	2.83	8173.24	0.592
		0.803	7.10	12176.0	1.485
		1.16	10.26	16151.71	2.146
		2.48	21.95	23522.13	4.588
		2.85	25.22	27280.80	5.27
		3.33	29.47	30869.72	6.16



GRAFICA E1

SOLUCION: 2.5% POLIOX.

caida de presion corregida
vs. rapidez de corte.



GRAFICA E 2

SOLUCION: 2.5% POLIOX.

caida de presion corregida
vs. L/D .

TABLA E3

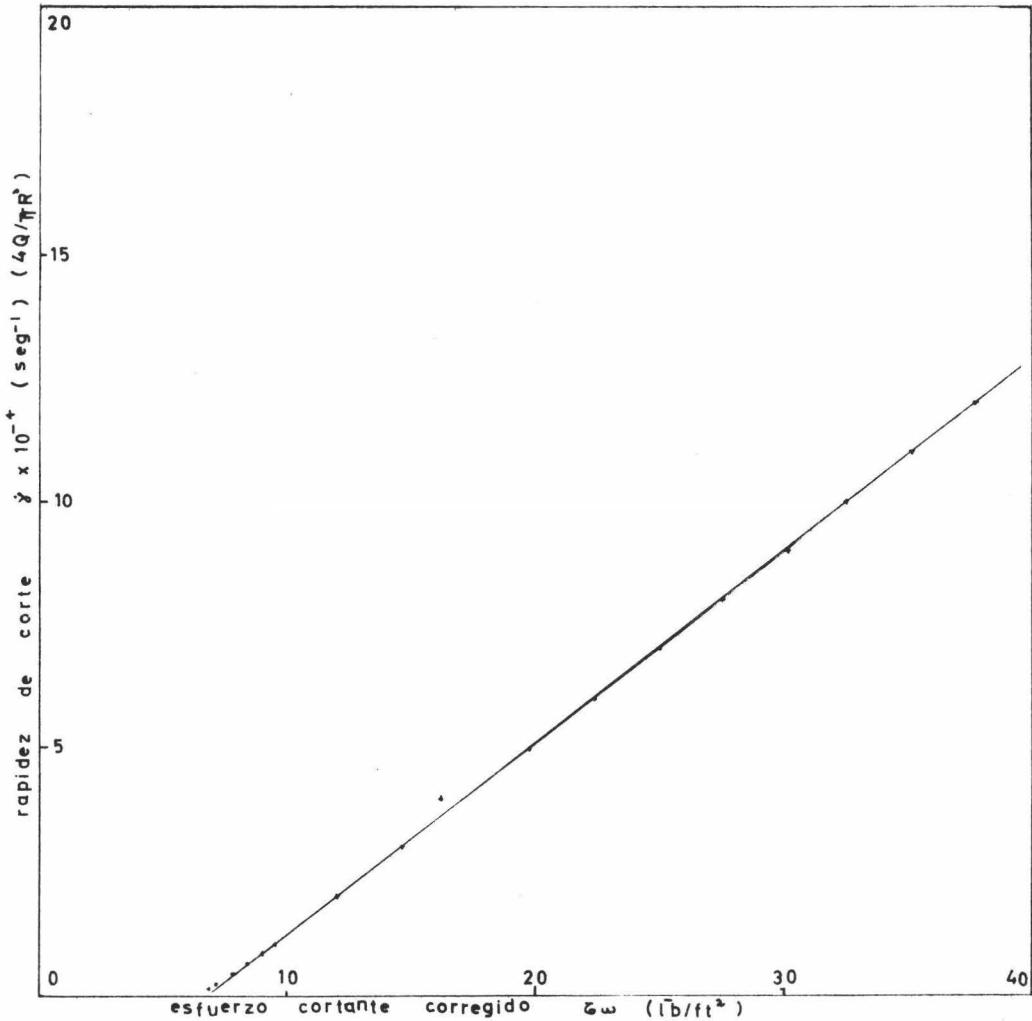
FACTOR DE CORRECCION

	$\gamma \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	n
	0.06	32.44
	0.08	31.07
	0.1	29.612
	0.2	23.492
	0.4	10.669
	0.6	0.155
2.5% POLIOX	0.8	-9.3
	1	-13.28
	2	-54.86
	3	-78.63
	4	-95.34
	5	-107.72
	6	-117.24
	7	-124.83
	8	-131.03
	9	-136.07
	10	-140.44
	11	-144.13
	12	-147.32
	13	-150.0
	14	-152.55
	15	-154.72

TABLA E4

ESFUERZO CORTANTE CORREGIDO VS. RAPIDEZ DE CORTE

$\dot{\gamma} \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	σ_w	\bar{t}_b / ft^2
0.06	6.730	
0.08	6.794	
0.1	6.854	
0.2	7.183	
0.4	7.756	
0.6	8.347	
0.8	8.932	
1	9.483	
2	12.062	
3	14.636	
4	17.209	
5	19.778	
6	22.349	
7	24.918	
8	27.485	
9	30.264	
10	32.627	
11	35.190	
12	37.779	
13	40.341	
14	42.894	
15	45.464	



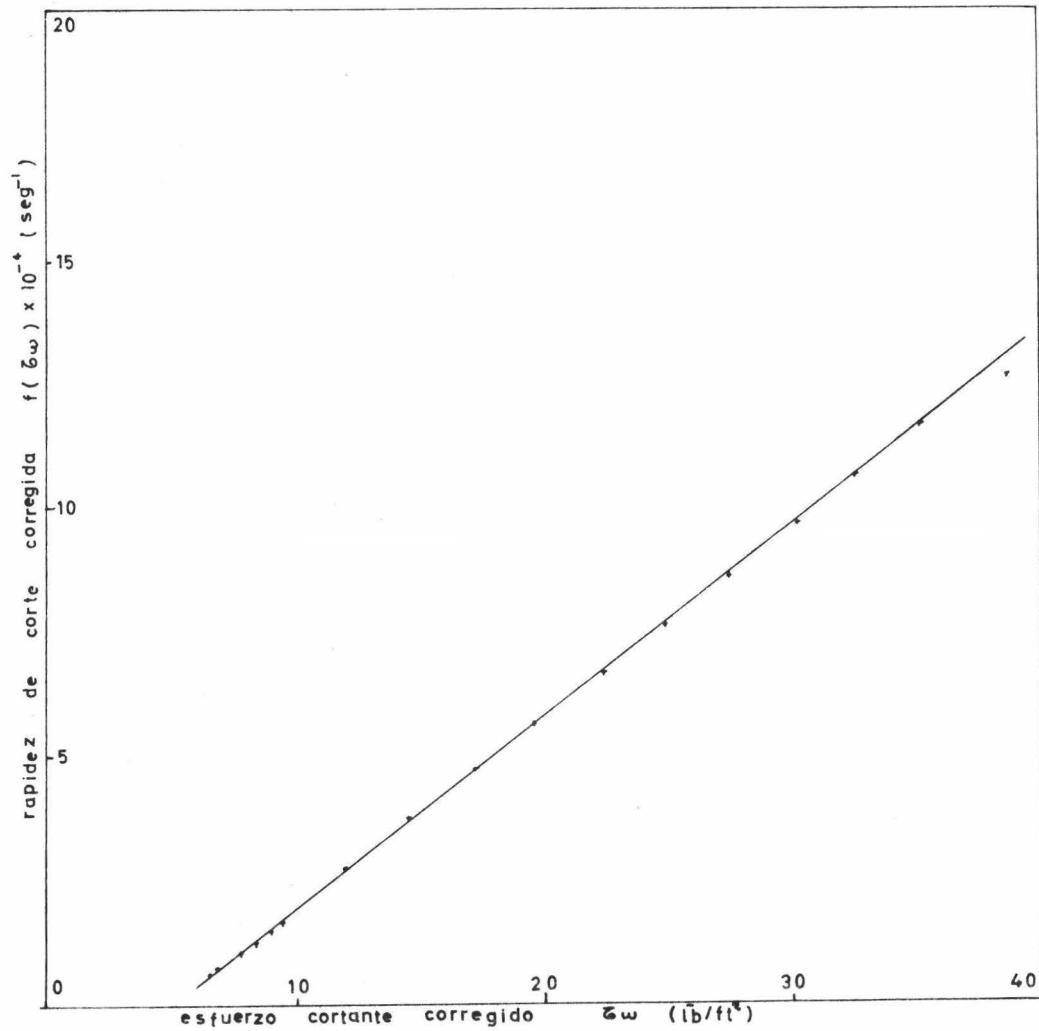
GRAFICA E 3

SOLUCION: 2.5% POLIOX.
rapidez de corte vs.
esfuerzo cortante corregido.

TABLA E5

RAPIDEZ DE CORTE CONVENCIONAL

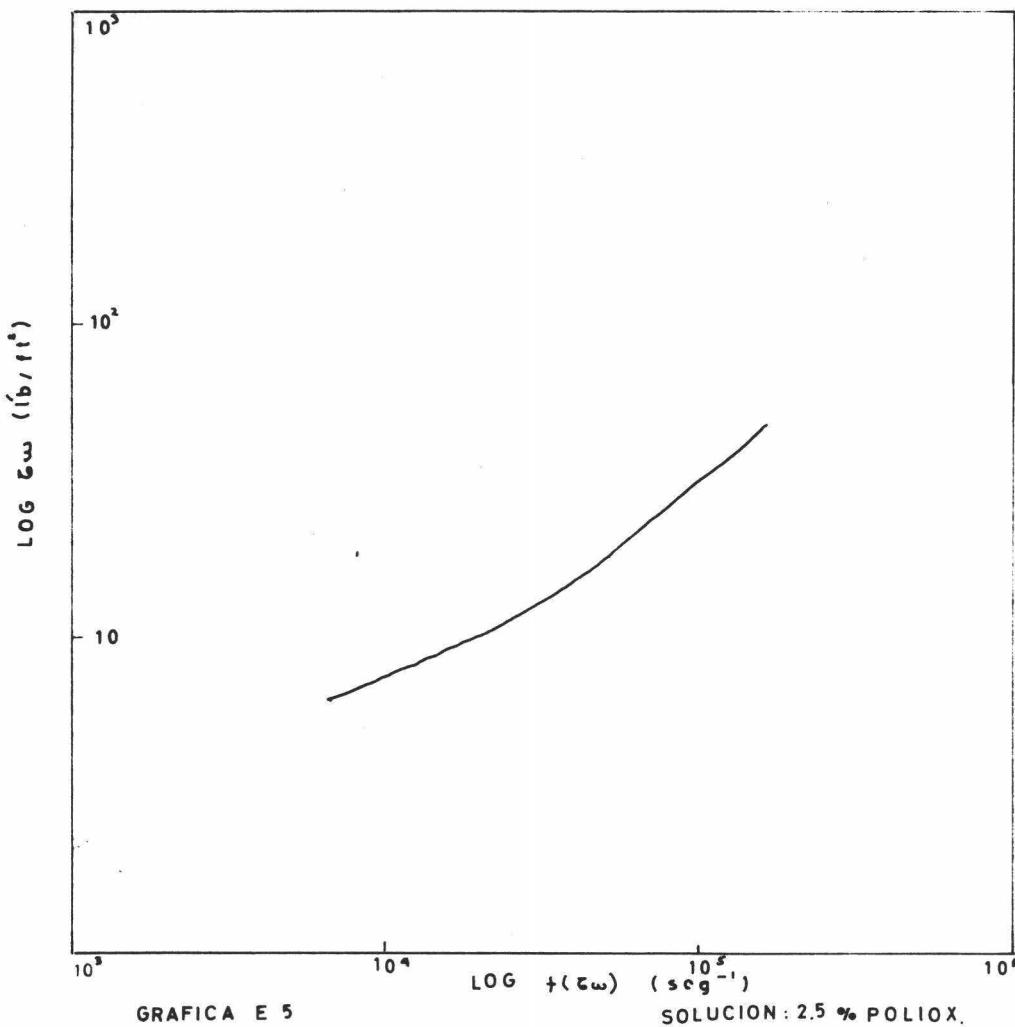
$\zeta\omega$	\bar{t}_b/ft^2	$\frac{\zeta\omega}{4}$	\bar{t}_b/ft^2	$\dot{y} \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	$\frac{3}{4} \dot{y} \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	$\frac{d \dot{y}}{d \zeta\omega}$	$f(\zeta\omega) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$
6.730	1.682	0.06	0.045	0.045	3.81	"	0.586
6.794	1.698	0.08	0.06	0.06	"	"	0.707
6.854	1.713	0.1	0.075	0.075	"	"	0.727
7.183	1.795	0.2	0.15	0.15	"	"	0.834
7.756	1.939	0.4	0.3	0.3	"	"	1.033
8.347	2.086	0.6	0.45	0.45	"	"	1.244
8.932	2.098	0.8	0.60	0.60	"	"	1.399
9.483	2.371	1	0.75	0.75	"	"	1.653
12.062	3.015	2	1.5	1.5	"	"	2.649
14.636	3.659	3	2.25	2.25	"	"	3.644
17.209	4.302	4	3.0	3.0	"	"	4.639
19.778	4.944	5	3.75	3.75	"	"	5.652
22.349	5.587	6	4.5	4.5	"	"	6.628
24.918	6.229	7	5.25	5.25	"	"	7.623
27.485	6.871	8	6.0	6.0	"	"	8.618
30.264	7.566	9	6.75	6.75	"	"	9.632
32.627	8.157	10	7.5	7.5	"	"	10.608
35.190	8.797	11	8.25	8.25	"	"	11.601
37.779	9.444	12	9.0	9.0	"	"	12.598
40.341	10.085	13	9.75	9.75	"	"	13.592
42.894	10.723	14	10.5	10.5	"	"	14.585
45.464	11.366	15	11.25	11.25	"	"	15.580



GRAFICA E 4
SOLUCION: 2.5% POLIOX.
curva de flujo.

TABLA 36
VISCOELASTICIDAD

$\zeta\omega$	\bar{f}_b/f_t^2	$f(\zeta\omega) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	γ	cp.
6.730		0.686		47.00
6.794		0.707		46.04
6.854		0.727		45.17
7.183		0.834		41.26
7.756		1.038		35.80
8.347		1.244		32.15
8.932		1.399		30.56
9.483		1.653		27.48
12.062		2.649		21.81
14.636		3.614		19.24
17.209		4.639		17.77
19.778		5.652		16.76
22.349		6.628		16.15
24.912		7.623		15.66
27.485		8.618		15.28
30.264		9.632		15.05
32.627		10.603		14.73
35.190		11.601		14.53
37.779		12.593		14.36
40.341		13.592		14.22
42.894		14.585		14.09
45.464		15.580		13.98



Ley de la Potencia.

TABLA E7

ESFUERZO CORTANTE CORREGIDO.

$\dot{\gamma} \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	$\frac{d \Delta \sigma}{d \Delta \theta}$	$\sigma \omega \text{ lb/ft}^2$
0.06	30.77	7.692
0.08	31.01	7.752
0.1	31.24	7.810
0.2	32.65	8.162
0.4	34.74	8.685
0.6	37.08	9.27
0.8	39.47	9.867
1	37.52	9.98
2	47.56	11.89
3	57.61	14.402
4	67.66	16.915
5	77.71	19.427
6	87.77	21.94
7	97.32	24.45
8	107.86	26.96
9	118.06	29.515
10	127.97	31.990
11	138.02	34.505
12	148.07	37.017
13	158.13	39.53
14	168.17	42.042
15	178.22	44.555

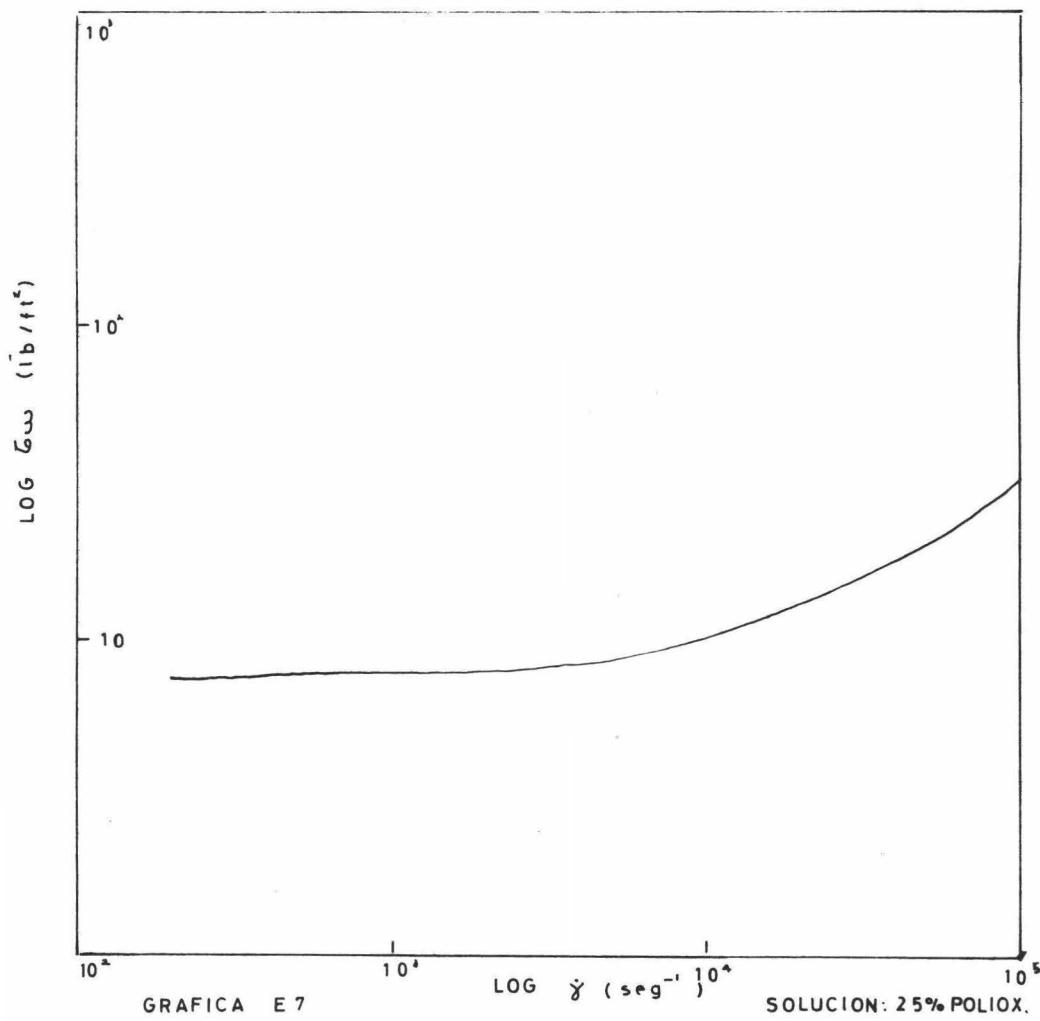


TABLA E8

CALCULO DE n' .

$\gamma \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	n'	$\frac{3n'+1}{4n'}$	$f(\omega) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$
0.06	0.026	10.365	0.207
0.08	"	"	0.425
0.1	0.066	4.503	0.950
0.2	0.131	2.658	0.53
0.4	"	"	1.063
0.6	"	"	1.598
0.8	0.196	2.025	1.62
1	0.316	1.541	1.541
2	0.401	1.373	2.746
3	0.475	1.276	3.828
4	0.590	1.173	4.692
5	0.700	1.107	5.535
6	0.835	1.049	6.294
7	"	"	7.343
8	"	"	8.392
9	"	"	9.441
10	"	"	10.491
11	"	"	11.539
12	"	"	12.588
13	"	"	13.637
14	"	"	14.686
15	"	"	15.735

TABLA n9 y TABLA n10

VISCOSIDAD.

$\bar{\tau}\omega$	$\bar{\tau}\omega / \text{ft}^2$	$f(\bar{\tau}\omega) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	η	c_P
7.692		0.638	175.32	
7.752		0.851	43.64	
8.685		1.063	39.14	
9.27		1.598	27.79	
9.867		1.62	26.18	
11.89		2.746	20.74	
14.402		3.828	18.02	
16.915		4.692	17.27	
19.427		5.535	16.815	
21.94		6.294	16.700	
24.45		7.343	15.95	
26.96		8.392	15.39	
29.515		9.141	14.93	
31.99		10.491	14.609	
34.505		11.539	14.32	
37.017		12.588	14.09	
39.53		13.637	13.88	
42.042		14.686	13.72	
44.555		15.735	13.56	

TABLA F1

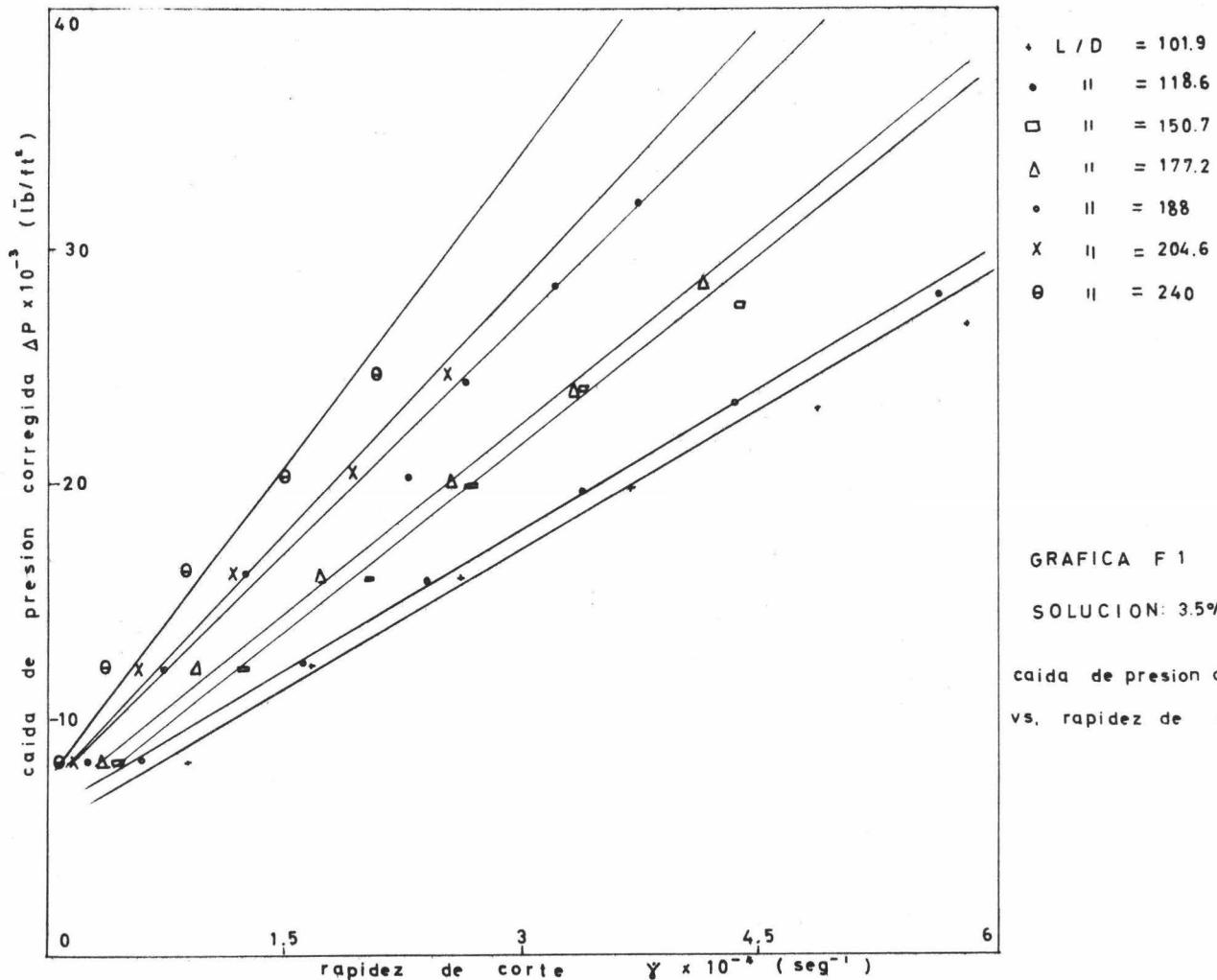
CORRECCION ENERGIA CINETICA.

SOLUCION 3.5% POLIOX.

DENSIDAD : 1.10 g/cm³.

L/D	ΔP \bar{b} /ft ²	Q $\frac{ft^3}{seg}$ $\times 10^4$	\bar{v} ft/seg	ΔP^* \bar{b} /ft ²	\dot{g} $\frac{seg^{-1}}{10^{-4}}$
101.9	4095.38	0.0706	0.625	4094.13	0.130
	8190.72	0.48	4.25	8147.73	0.888
	12286.08	0.363	7.64	12147.16	1.60
	16381.44	1.410	12.48	16010.88	2.61
	20476.20	1.990	17.61	19738.68	3.68
	24572.16	2.63	23.27	23282.93	4.86
	28667.52	3.14	27.78	26829.80	5.81
113.6		0.0513	0.454	4094.87	0.095
		0.327	2.89	8170.79	0.605
		0.864	7.64	12147.16	1.60
		1.306	11.55	16063.94	2.41
		1.92	16.99	19789.70	3.55
		2.36	20.83	23534.05	4.37
		3.05	26.99	26933.64	5.64
150.7		0.0192	0.169	4095.29	0.0355
		0.24	2.12	8180.02	0.444
		0.684	6.05	12198.97	1.265
		1.100	9.73	16156.12	2.035
		1.45	12.83	20085.03	2.683
		1.83	16.19	23948.32	3.385
		2.385	21.10	27607.92	4.412

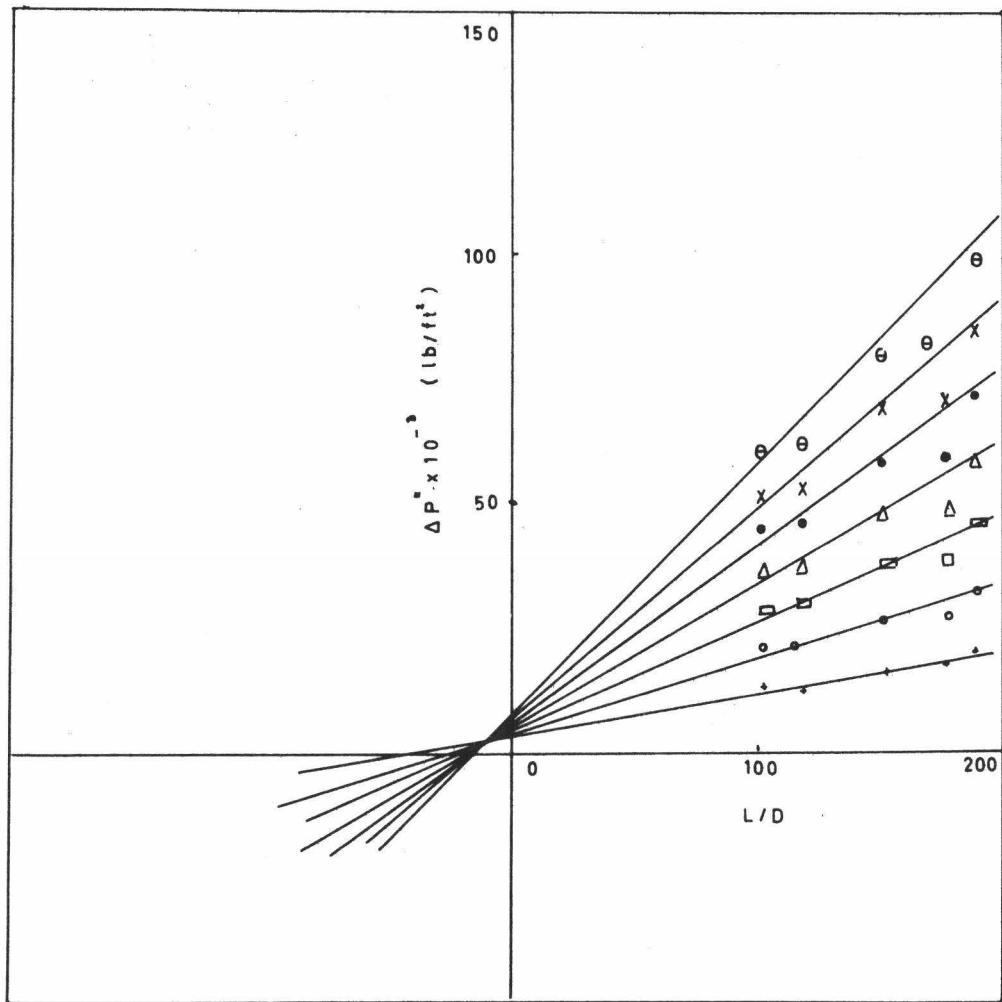
177.2		0.0128	0.113	4095.32	0.0237
		0.186	1.64	8184.27	0.344
		0.51	4.51	12237.67	0.943
		0.937	8.29	16217.88	1.730
		1.380	12.21	20121.98	2.55
		1.81	16.01	23962.12	3.35
		2.26	20.00	27715.52	4.18
188		0.00963	0.0852	4095.34	0.0178
		0.144	1.27	8186.88	0.266
		0.398	3.52	12256.59	0.736
		0.69	6.10	16292.88	1.276
		1.25	11.06	20185.67	2.312
		1.43	12.65	24191.30	2.645
		1.75	15.48	28097.20	3.237
204.6		0.00642	0.0568	4095.35	0.0118
		0.0995	0.88	8188.87	0.184
		0.305	2.699	12268.74	0.564
		0.642	5.68	16304.65	1.187
		1.100	9.73	20251.48	2.035
		1.38	12.21	24217.34	2.553
		0.00321	0.0284	4095.358	0.00593
240		0.0321	0.284	8190.53	0.0593
		0.1926	1.704	12279.16	0.356
		0.472	4.176	16339.91	0.873
		0.815	7.21	2032.99	1.507
		1.13	10.00	24334.16	2.09



GRAFICA F 1

SOLUCION: 3.5% POLIOX.

caida de presion corregida
vs. rapidez de corte.



GRAFICA F 2

SOLUCION: 3.5% POLIOX.

caida de presion corregida.

vs. L/D.

TABLA F3

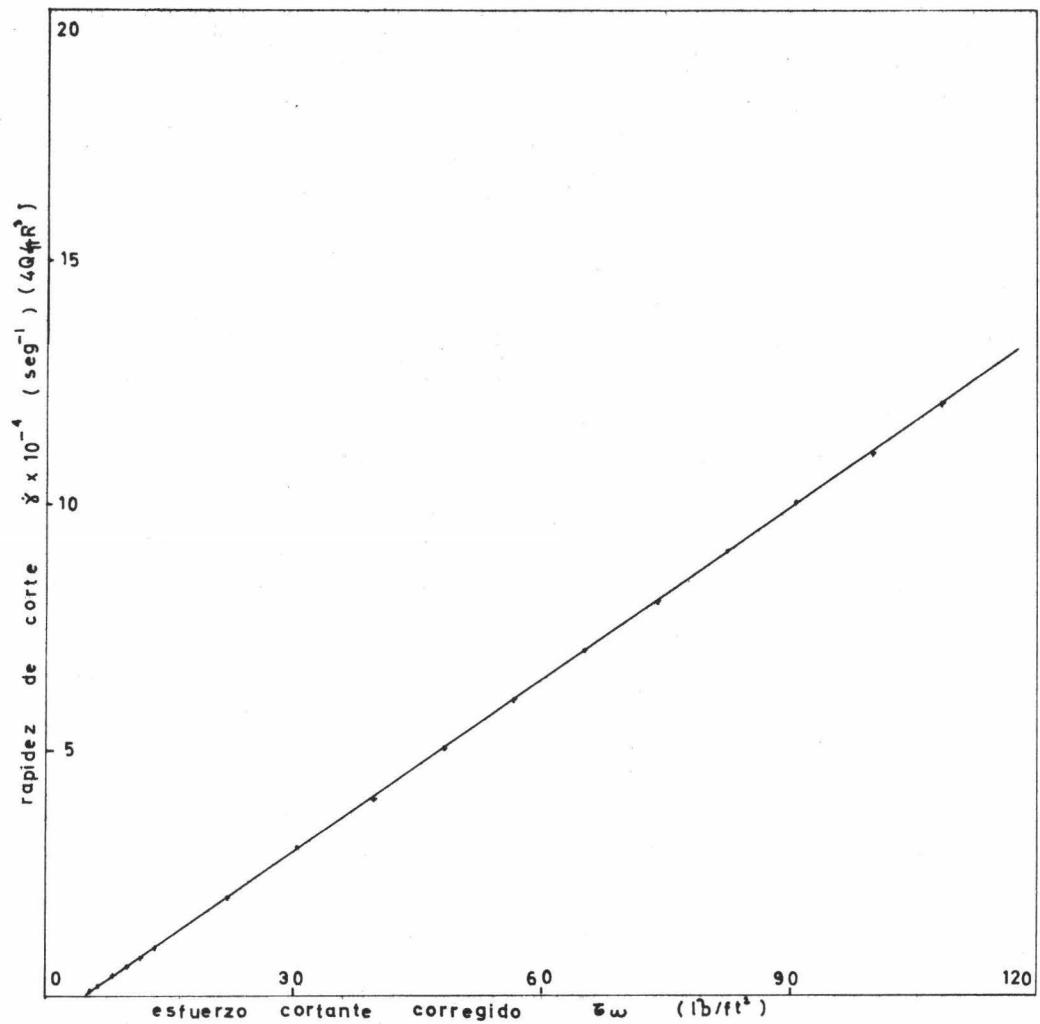
FACTOR DE CORRECCION.

	$\gamma \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	n
	0.004	-188.16
	0.006	-187.52
	0.008	-186.66
	0.010	-185.88
	0.020	-182.37
	0.040	-175.65
	0.060	-169.35
	0.080	-163.51
	0.1	-158.12
	0.2	-135.63
3.5 % POLIOX	0.4	-105.80
	0.6	-86.91
	0.8	-73.55
	1	-63.45
	2	-38.25
	3	-30.00
	4	-20.92
	5	-18.40
	6	-15.865
	7	-14.00
	8	-12.570
	9	-11.44
	10	-10.53

TABLA F4

ESFUERZO CORTANTE CORREGIDO VS. RAPIDEZ DE Corte.

$\dot{\gamma} \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	$C_w \text{ lb/ft}^2$
0.004	4.516
0.006	4.532
0.008	4.551
0.01	4.570
0.02	4.657
0.04	4.834
0.06	5.011
0.08	5.188
0.1	5.364
0.2	6.243
0.4	7.997
0.6	9.741
0.8	11.494
1	13.262
2	22.002
3	30.399
4	39.553
5	48.019
6	56.682
7	65.349
8	74.012
9	82.676
10	91.338



GRAFICA F 3

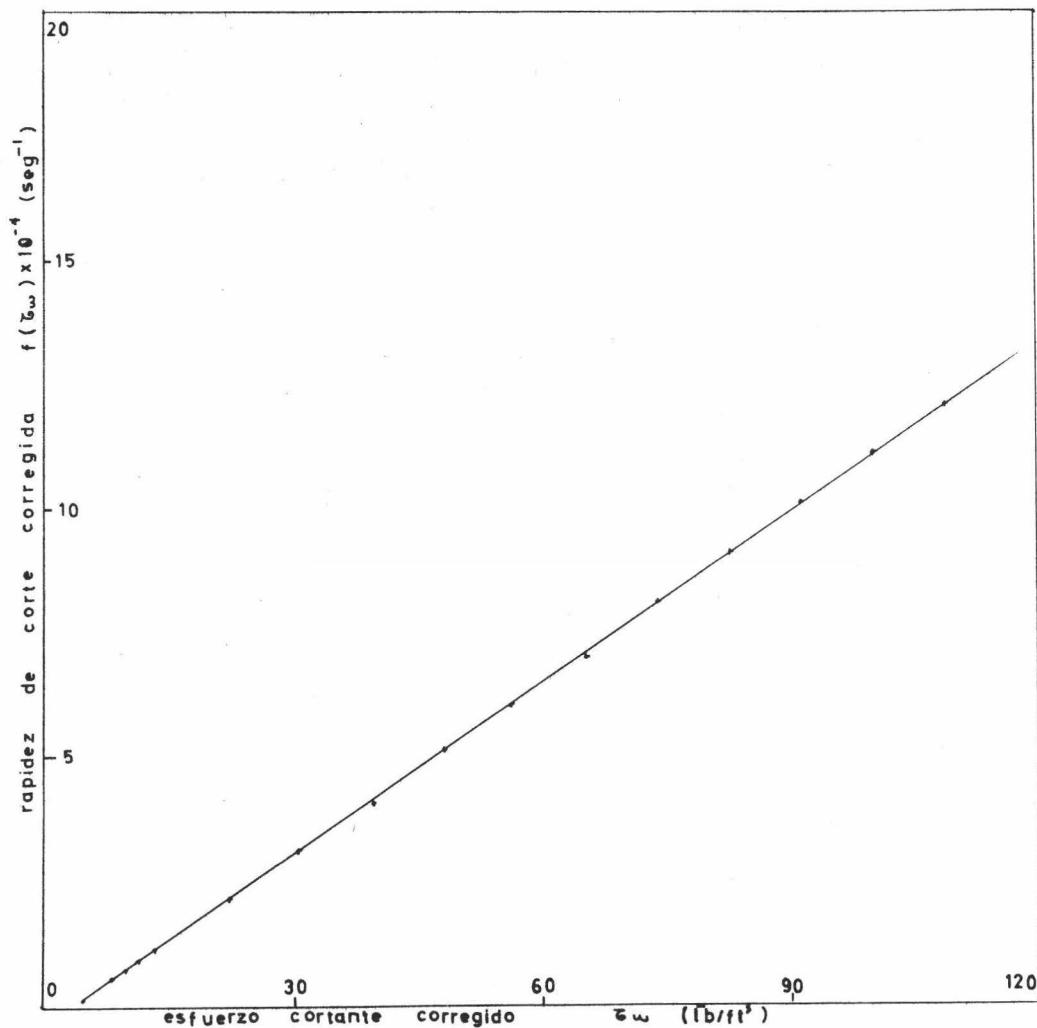
SOLUCION: 3.5% POLIOX.

rapidez de corte vs.
esfuerzo cortante corregido.

TABLA F5

RAPIDEZ DE CORTE CORREGIDA.

$\bar{\omega}_w$	\bar{b}/ft^2	$\frac{\bar{\omega}_w}{4}$	\bar{b}/ft^2	$\dot{y} \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	$\frac{3}{4} \dot{y} \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	$\frac{d \dot{y}}{d \bar{\omega}_w}$	$f(\bar{\omega}_w) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$
4.498		1.124		0.004	0.003	1.143	0.132
4.532		1.133		0.006	0.0045	"	0.134
4.551		1.138		0.008	0.006	"	0.136
4.570		1.142		0.01	0.0075	"	0.138
4.657		1.164		0.02	0.015	"	0.148
4.834		1.208		0.04	0.03	"	0.168
5.011		1.253		0.06	0.045	"	0.188
5.188		1.297		0.08	0.06	"	0.208
5.364		1.341		0.1	0.075	"	0.228
6.243		1.561		0.2	0.15	"	0.328
7.997		1.999		0.4	0.3	"	0.528
9.741		2.435		0.6	0.45	"	0.718
11.494		2.873		0.8	0.6	"	0.928
13.262		3.315	1		0.75	"	1.129
22.002		5.500	2		1.50	"	2.128
30.399		7.599	3		2.25	"	3.118
39.553		9.388	4		3.00	"	4.130
48.019		12.005	5		3.75	"	5.122
56.622		1.170	6		4.50	"	6.119
65.319		16.137			5.25	"	7.117
74.012		18.503	3		6.00	"	8.115
82.676		20.669	9		6.75	"	9.112
91.333		22.834	10		7.5	"	10.111



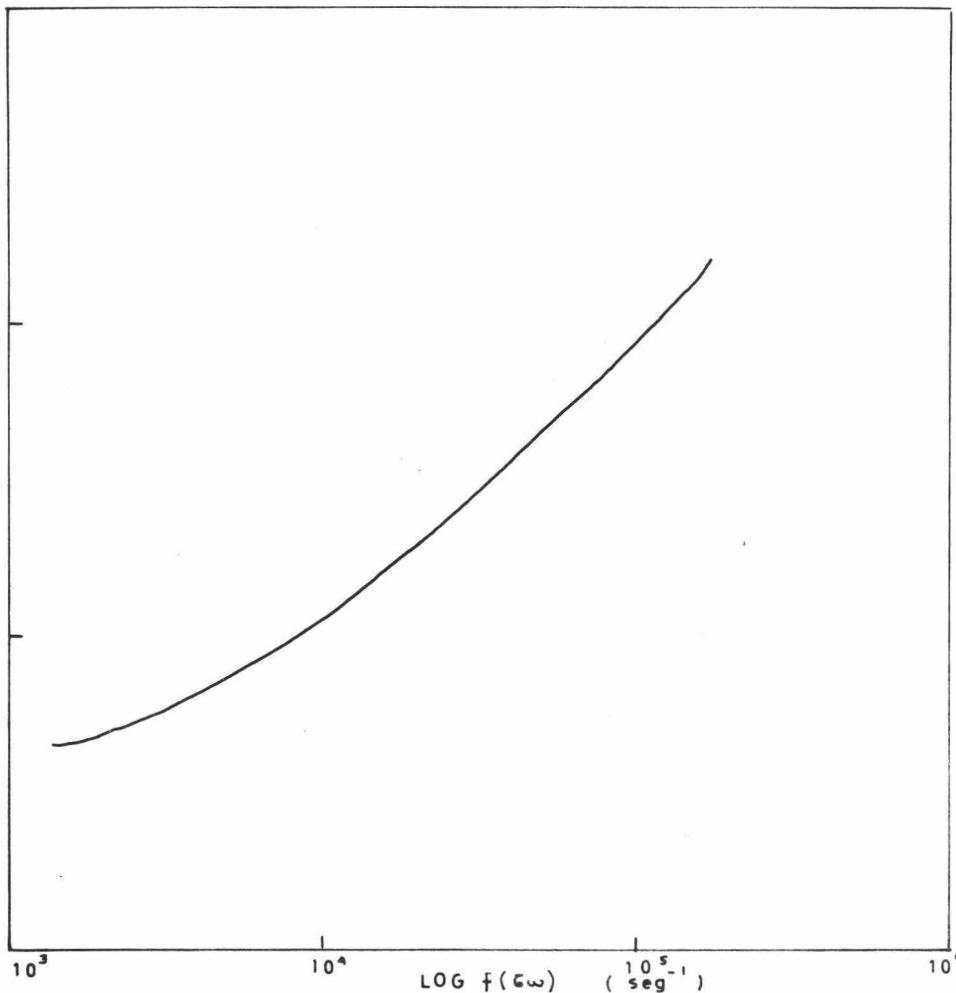
GRAFICA F4
SOLUCION: 3.5% POLIOX.
curva de flujo.

TABLA F6

VISCOSE AD.

$\xi\omega$	\bar{b} / ft^2	$f(\xi\omega) \times 10^4 \text{ sec}^{-1}$	γ	cP
4.516		0.1320	163.91	
4.532		0.134	162.03	
4.551		0.136	160.32	
4.570		0.138	158.66	
4.597		0.148	150.75	
4.834		0.168	137.85	
5.011		0.188	127.70	
5.188		0.208	119.50	
5.364		0.228	112.71	
6.243		0.328	91.19	
7.997		0.528	72.56	
9.741		0.718	65.00	
11.949		0.928	59.34	
13.262		1.129	56.28	
22.002		2.128	49.53	
30.399		3.118	46.71	
39.553		4.130	45.38	
48.019		5.122	44.91	
56.682		6.119	44.38	
65.349		7.117	43.99	
74.012		8.115	43.69	
82.676		9.112	43.47	
91.338		10.111	43.28	

LOG ζ_{ω} ($\frac{1}{\zeta_0} / f_1$)



GRAFICA F 5

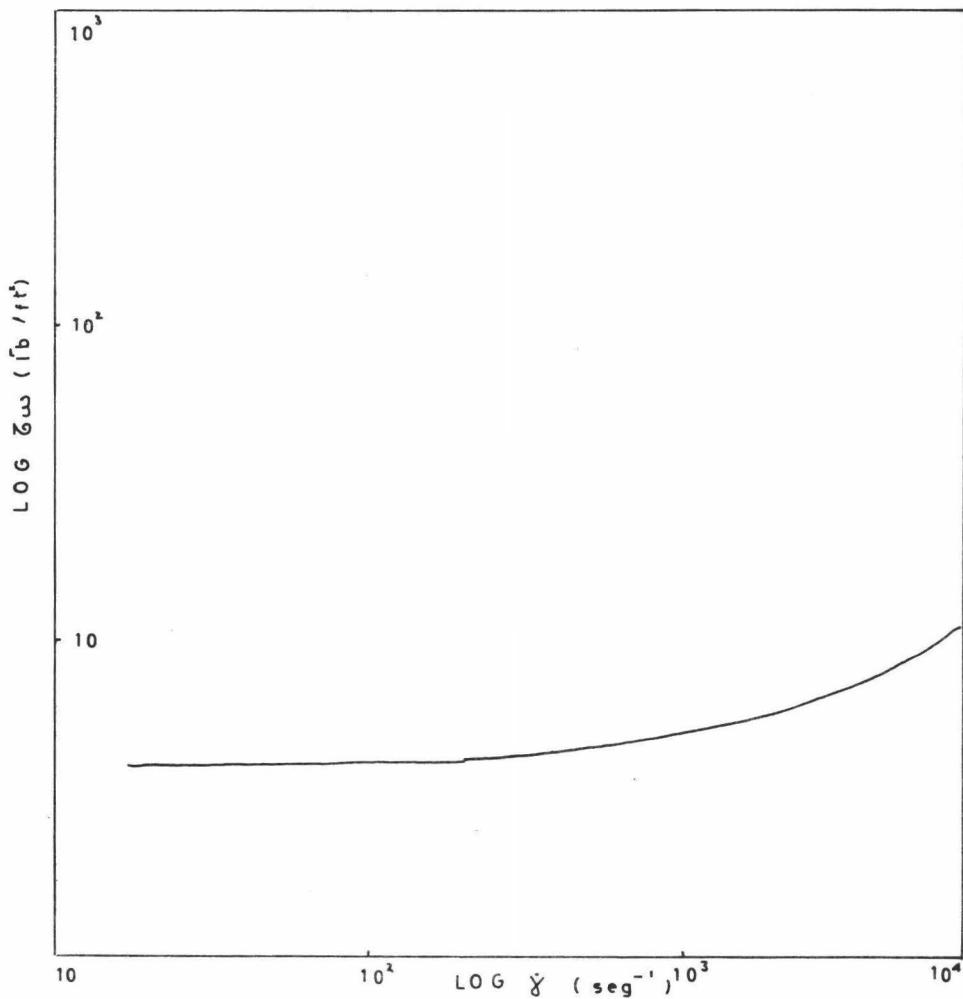
SOLUCION: 3.5% POLIOX.

Ley de la Potencia.

TABLA F7

ESFUERZO CORTANTE CORREGIDO.

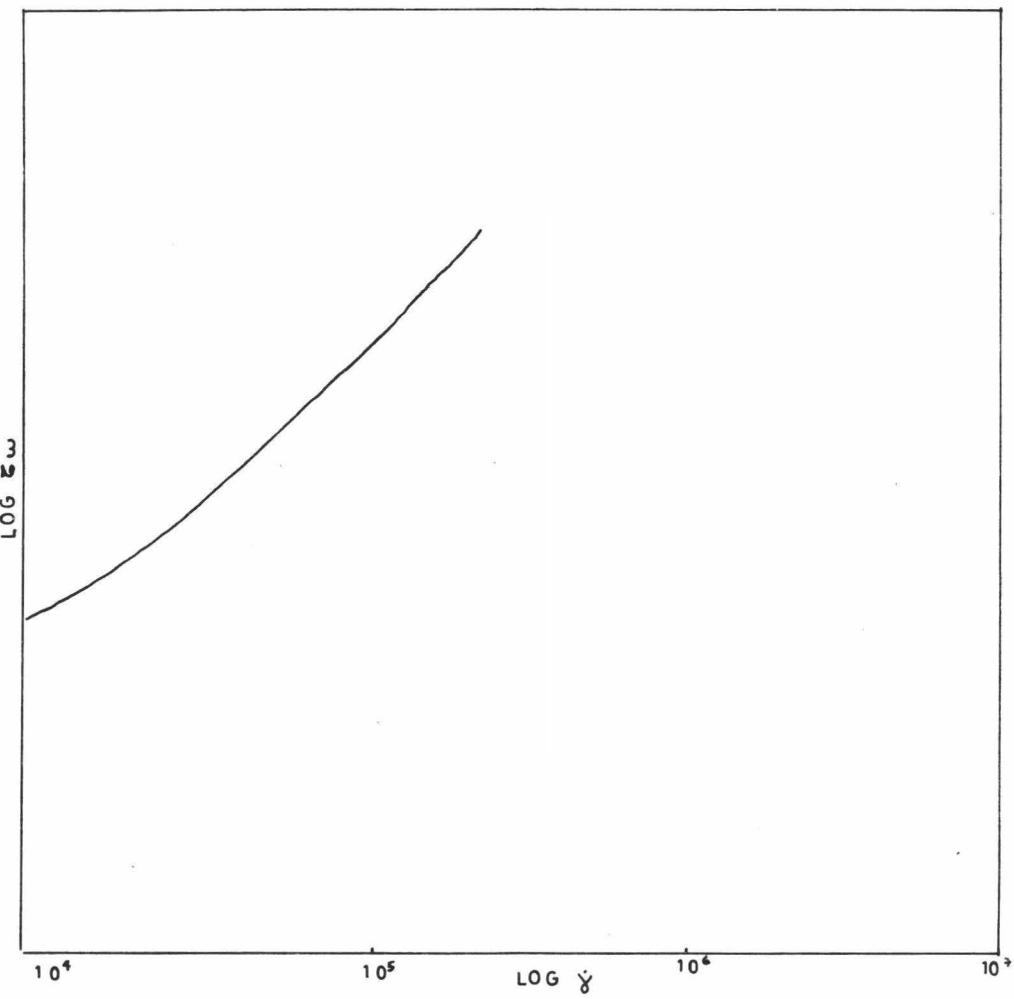
$\dot{\gamma} \times 10^{-4} \text{ deg}^{-1}$	$\frac{d \Delta P}{d \Delta \theta}$	$\zeta \omega$	\bar{t}_b / ft^2
0.004	17.24	1.31	
0.005	17.30	4.325	
0.008	17.38	4.345	
0.01	17.45	4.362	
0.02	17.79	4.447	
0.04	18.10	4.62	
0.06	19.17	4.792	
0.08	19.86	4.965	
0.1	20.55	5.137	
0.2	24.00	6.00	
0.4	30.89	7.722	
0.6	37.77	9.442	
0.8	46.67	11.667	
1	51.81	12.952	
2	86.27	21.567	
3	117.99	29.497	
4	155.19	38.797	
5	189.65	47.412	
6	224.10	56.025	
7	258.56	64.640	
8	293.02	73.255	
9	327.48	81.870	
10	361.93	90.482	



GRAFICA F 7

SOLUCION: 3.5% POLIOX.

Calculo de n' .



GRAFICA F 7 cont.

TABLA F8

CALCULO DE n^1

$\dot{\gamma} \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	n^1	$\frac{3n^1 + 1}{4n^1}$	$f(\zeta\omega) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$
0.004	0.0449	6.313	0.0253
0.006	"	"	0.0379
0.008	"	"	0.0505
0.01	"	"	0.0632
0.02	"	"	0.126
0.04	0.173	2.157	0.086
0.06	"	"	0.129
0.08	"	"	0.172
0.1	"	"	0.215
0.2	0.302	1.372	0.274
0.4	0.478	1.273	0.509
0.6	"	"	0.764
0.8	0.533	1.214	0.971
1	0.736	1.029	1.089
2	0.872	1.036	2.072
3	0.920	1.022	3.066
4	"	"	4.088
5	"	"	5.110
6	"	"	6.132
7	"	"	7.154
8	"	"	8.176
9	"	"	9.193
10	"	"	10.220

TABLA 82 Y TABLA F10.

VISCOSIDAD.

$\sigma \omega$	\bar{f}_b / ft^2	$f(\sigma \omega) \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	η	cp.
4.31		0.0253	816	
4.325		0.0379	546	
4.345		0.0505	412	
4.362		0.0632	331	
4.62		0.086	257.37	
4.792		0.129	177.97	
4.965		0.172	138.30	
5.137		0.215	114.47	
6.000		0.274	104.91	
7.722		0.509	72.68	
9.442		0.764	59.21	
11.667		0.971	57.56	
12.952		1.089	56.98	
21.567		2.072	49.87	
29.497		3.066	46.09	
38.797		4.092	45.47	
47.412		5.110	44.45	
56.025		6.132	43.77	
64.640		7.154	43.29	
73.255		8.176	42.92	
81.870		9.198	42.64	
90.482		10.220	42.41	

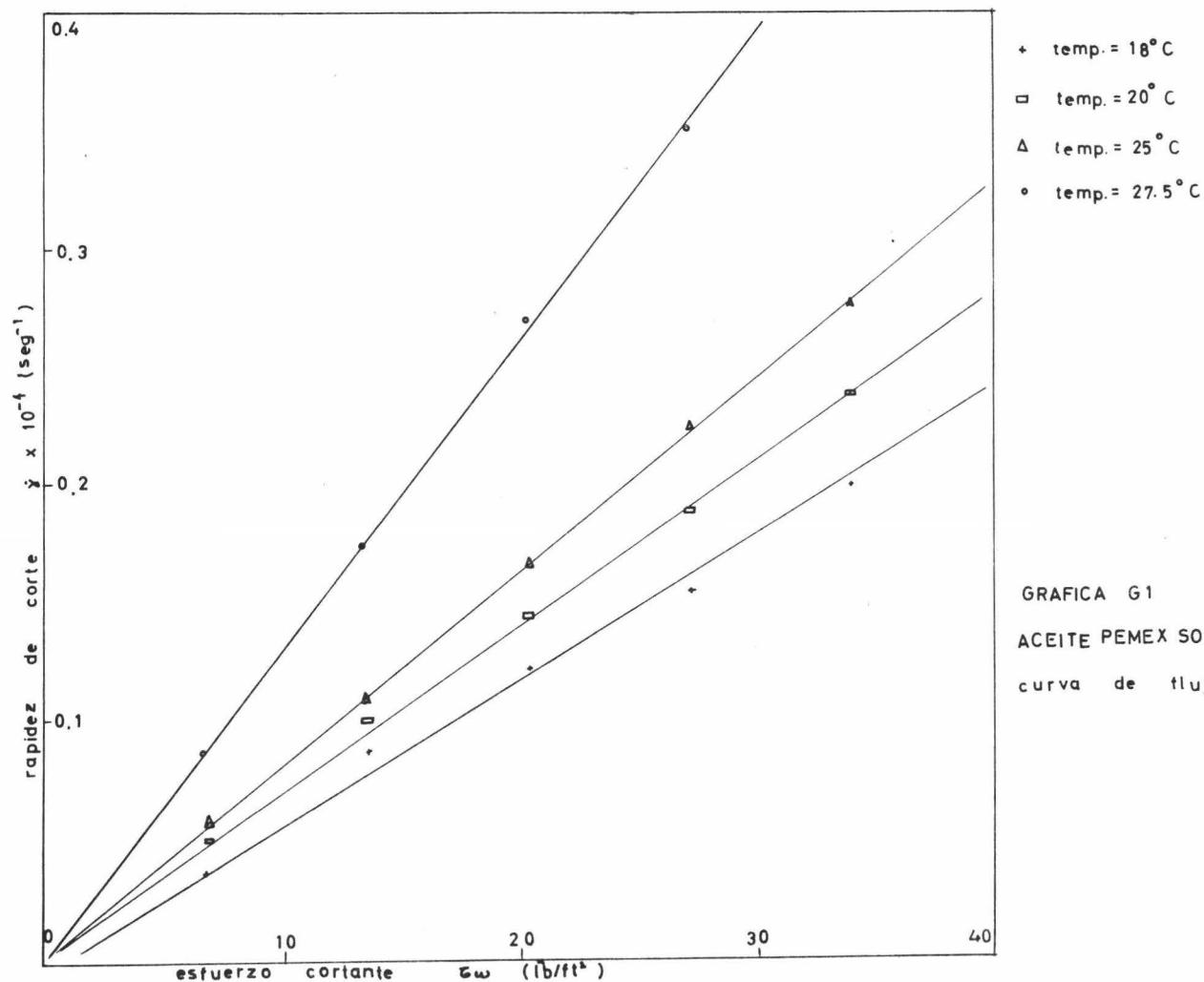
TABLA G1

SOLUCION: ACEITE PEMEX SCL

Densidad: P = 0.8986 g/cm³.

T °C	ΔP lb/ft ²	Q ft ³ /seg x 10 ⁴	γ °P
18	4095.226	0.02357	742
	8190.381	0.047139	742
	12285.4	0.06677	785
	16380.402	0.08248	812
	20475.083	0.10605	824
	24569.439	0.1335	786
	28663.751	0.15712	786
20	4095.214	0.02749	636
	8190.258	0.05499	636
	12285.138	0.07356	674
	16379.848	0.10212	685
	20474.235	0.12962	685
	24568.577	0.15319	685
	28662.316	0.18461	673

25	4095.2094	0.031426	556
	8190.189	0.05892	593
	12284.834	0.09034	581
	16379.177	0.12176	574
	20473.398	0.14926	585
	24566.956	0.18461	568
	28660.393	0.21604	566
27.5	4095.0208	0.047136	371
	8189.3629	0.09427	371
	12282.855	0.14533	362
	16376.014	0.1885	371
	20467.179	0.3413	358
	24558.907	0.2946	356
	28647.586	0.3413	358



GRAFICA G1
ACEITE PEMEX SOL SAE 50.
curva de flujo.

BIBLIOGRAFIA.

(1) Mc.Kelvey, James M
"Polymer Processing"
John Wiley & Sons Inc. (1962)

(2) Wilkinson, W.L.
"Non Newtonian Fluids"
Pergamon Press (1960)

(3) Alfrey, T. y Doty, P.
" The Methods of Specifying the Properties of Visco-
elastic Materials".
Journal of Applied Physics, Vol. 16, Nov. 1945.

(4) Wohl, M.H.
"Rheology of Non Newtonian Materials".
Chemical Eng. , Feb. 12 , 1968.

(5) Brodkey, R.S.
" The Phenomena of Fluid Motion".
Addison Wesley, 1967.

(6) Oka, S.
" The Principles of Rheometry ".
Rheology (Eirich), Vol. 3, pag. 18-80.
Academic Press, 1960.

(7) Marion G.H., Triegler, I.M.
Journal of Applied Physics, 25, 72 (1954).

(8) Oka, S., Sato, Y.
Bull. Kobayashi Inst. Phys. Research, 3, 104 (1953).

(9) Dodge, D.W., Metzner, A.B.
" Rheologica Acta Band"1 (Ago 1958)

(10) Van Wazer, J.R., Lyons, J.W. , Kim, K.Y., Calwell,R.E.
" Viscosity and Flow Measurment".
Interscience Putiishers (1963).

(11) Oka, S.
" Rheology: Theory and Applications".
Rheology (Birich) Vol. 3.
Academic Press (1960).

(12) Rabinowitsch, B.
" Über die Viskosität und Elastizität von Solen ".
Zeitschrift Physikalische Chemie, Apt. A, Bd. 145a
pag. 1-26.

(13) Bagley, E.B.
" End Corrections in the Capillary Flow of Polyethilene ",
J. APPL. Phys. 28,624 (1957).

(14) Swindells, J.F.
J. Res. Nat. Bur. Std., 48, 1 (1952).

(15) García Franco, C.A.

" The Capillary Experiment in Rheology ".(Com.Per.)

(16) Brodkey, R.S. and Metzger, A.

" Measurment of the Flow of Molten Polymers through
Short Capilaries".

J. Appl. Pol. Science, Vol. 7 pag 399-410 (1963).

(17) Mc.Intosh, D.L.

" Elastic Effects in the Extrusion of Polymer Solutions ".

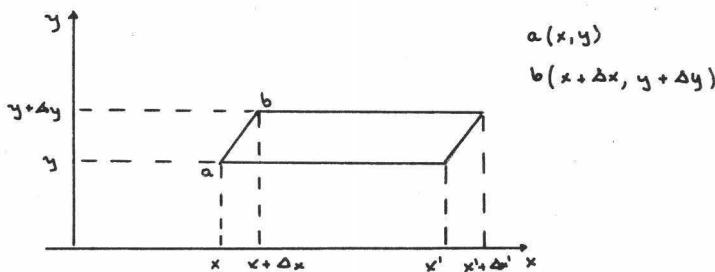
Doctoral Thesis, Washington University, St. Louis (1960).

APENDICE A

ECUACION REOLOGICA DE UN FLUIDO NEWTONIANO.

Estableceremos una relación entre el tensor esfuerzo y el tensor rapidez de deformación.

Para comenzar consideraremos esfuerzo cortante simple y flujo entre dos placas paralelas. La placa superior está en movimiento y la inferior en reposo. Consideremos dos puntos a y b.



Después de un tiempo Δt , a se ha movido una distancia $\mathbf{u}_x \Delta t$ y b una distancia $[\mathbf{u}_x + (\frac{\partial \mathbf{u}_x}{\partial y}) \Delta y] \Delta t$. La separación $\Delta x'$ de las partículas está dada por:

$$\Delta x' = \Delta x + \left[\left(\frac{\partial \mathbf{u}_x}{\partial y} \right) \Delta y \right] \Delta t$$

Por lo tanto, la rapidez promedio con la que se están separando las partículas en la dirección x es:

$$\left[\frac{\Delta x' - \Delta x}{\Delta t} \right] = \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \Delta y \quad (1)$$

Tomando límites

$$\lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ \Delta y \rightarrow 0}} \left[\frac{\Delta x' - \Delta x}{\Delta t \Delta y} \right] = \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)$ representa la rapidez de deformación en un punto y momento particular. La ley de Newton de la viscosidad se establece postulando la relación lineal

$$\delta_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \quad (3)$$

El caso más general es aquel en el que las partículas se mueven en cualquier dirección

$$\left[\frac{\Delta x' - \Delta x}{\Delta t} \right] = \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right) \Delta x + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \Delta y + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \Delta z \quad (4)$$

Además, si Δs es la distancia inicial de separación de las partículas

$$\Delta x = n_i \Delta s$$

donde n_i es la componente en x del vector unitario \vec{n} que tiene la dirección de la línea que une a las partículas.

$$\lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ \Delta s \rightarrow 0}} \left[\frac{\Delta x' - \Delta x}{\Delta s \Delta t} \right] = \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right) n_x + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) n_y + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} \right) n_z \quad (5)$$

El término del lado derecho es la magnitud de la componente en x del vector formado por el producto punto del vector \vec{n} y

la diáada $\nabla \bar{v}$. Los componentes de la diáada $\nabla \bar{v}$ son de la forma $(\frac{\partial v_i}{\partial x_j})$ y por lo tanto, la diáada no es simétrica. Como el tensor esfuerzo es simétrico ($\tau_{12} = \tau_{21}$), $\nabla \bar{v}$ no puede ser el tensor general de deformación. Aprovechando la propiedad de que cualquier tensor puede ser concebido como la suma de su parte simétrica y su parte antisimétrica, podemos decir que:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

Dado que la parte antisimétrica de $\nabla \bar{v}$ describe una rotación sin deformación, este término no se incluye en la formulación de la ecuación reológica. Por lo tanto,

$$\Delta_{ij} = \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \text{ Tensor de rapidez de deformación.}$$

Refiriéndonos al tensor anterior, podemos concluir que un esfuerzo aplicado a un fluido compresible producirá deformaciones volumétricas y distorsionantes. Por lo tanto, el tensor rapidez de deformación Δ_{ij} debe separarse en dos partes:

Una que caracterize la rapidez de deformación volumétrica y otra la distorsionante.

$$\Delta_{ij} = \Delta'_{ij} + \Delta_m \delta \quad (7)$$

$$\text{donde } \Delta_m = \frac{1}{3} (\Delta_{11} + \Delta_{22} + \Delta_{33}) = \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{v}) \quad (8)$$

Δ'_{ij} = tensor de rapidez de deformación deviatórico.

Se puede probar que Δm representa $2/3$ de la rapidez de expansión volumétrica. También se nota que la suma de los elementos de la diagonal principal del tensor deviatórico son 0 y que éste caracteriza únicamente rapideces de deformación distorsionantes.

La ecuación reológica para el fluido Newtoniano se postula a través de la relación lineal entre los tensores esfuerzo y rapidez de deformación:

$$\mathcal{E} - (-P)\mathcal{S} = A\Delta' + B\Delta m\mathcal{S} \quad (9)$$

$$\sigma = \mathcal{E} - P\mathcal{S} \quad (10)$$

La presión hidrostática negativa es restada de cada uno de los elementos de la diagonal del tensor esfuerzo, ya que los esfuerzos de compresión resultantes de ella, se oponen a los esfuerzos normales, causantes del potencial para la expansión volumétrica.

Introduciendo (7) y (8) en (9) obtenemos:

$$\sigma = -P\mathcal{S} + \mu\Delta + (\kappa - \frac{2}{3}\mu)(\nabla \cdot \mathcal{E})\mathcal{S} \quad (11)$$

donde $\mu = A$ $\kappa = 2/3 B$

Sustituyendo (10) en (11) obtenemos la ecuación reológica para el fluido Newtoniano:

$$\tau = \mu \Delta + (\lambda - \frac{2}{3}\mu)(\nabla \cdot \vec{v}) \quad (12)$$

Para el caso especial de un fluido incompresible $(\nabla \cdot \vec{v}) = 0$ esta ecuación se reduce a:

$$\tau_{ij} = \mu \Delta \delta_{ij}.$$

APENDICE B

MÉTODOS ESTADÍSTICOS

a) CONTABILIDAD DEL MÉTODO EXPERIMENTAL

DATOS:

<i>h</i>	X	(X - X) ²
1	16.6	0.1369
2	16.7	0.0049
3	16.6	0.0289
4	16.8	0.0009
5	16.6	0.0289
6	17.0	0.0529
7	16.4	0.1369
8	16.6	0.0289
9	16.7	0.0049
10	16.9	0.0169
11	17.1	0.1089
12	16.9	0.0169
13	16.4	0.1369
14	16.9	0.0169
15	16.7	0.0049
16	16.6	0.0729
17	17.0	0.0529
18	17.1	0.1089
19	16.8	0.0009
20	16.6	0.1369
21	16.8	0.0009

#	X	(X - X) ²
22	16.8	0.0009
23	16.8	0.0009
24	16.6	0.0289
25	17	0.0529
26	17.2	0.1849
27	16.9	0.0169
28	16.6	0.0729
29	17.1	0.1089
30	17.0	0.0529

MEDIA:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{i}$$

DESVIACION ESTANDAR:

$$\sigma = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 / i}$$

MEDIA: $\bar{x} = 16.793$

DESVIACION ESTANDAR: $\sigma = 0.2093$

CALCULO DEL ERROR:

$$e = \frac{\sigma}{\sqrt{i-1}}$$

$$e = 0.03886$$

CALCULO DE LOS LIMITES DE CONFIABILIDAD:

$$\mu = \bar{x} \pm t(e)$$

Para una confiabilidad de 95 % para 29 grados de libertad

$$t = \pm 2.04$$

Para 90 % y 29 grados de libertad

$$t = \pm 1.70$$

95 % :

$$\mu = 16.77 \pm 0.0792$$

$$\mu = 16.849$$

$$\mu = 16.69$$

90 % : $\mu = 16.77 \pm 0.066$

$$\mu = 16.83$$

$$\mu = 16.704$$

De los resultados obtenidos deducimos que el aparato opera con un 90 % de confiabilidad.

3) MÍNIMOS CUADRADOS.

Para corregir los datos experimentales directos se empleó el método de mínimos cuadrados. A continuación damos el listado del programa empleado.

* UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
* CENTRO DE SERVICIOS TECNICOS
* COMPILADOR FORTRAN, NIVEL 2.5.01C, LUFPO
* JULVES 7 DE MARZO DE 1974
*

NOMBRE DEL PROGRAMA = ECONOMIAII.

C FACULTAD DE QUIMICA UNAM

FORMAT

DIMENSION X(15),Y(15),PROXY(15),CUAX(15),LIFX(15),DIEY(15),VAFI(15)
1),DESV(15),DEST(15),DBS(15),ESMAX(15),ESMIN(15),ERR(15),ELRC(15),
2ERRU(15),ERRDC(15)

DATA K/77/, STU/2.577/, N/28/

DO 55 L=1,N

C EL ORDEN DE LOS DATOS ES

C SOL. 0.5% RAPIDEZ LE CORTE DE 1 A 15

C SOL. 1.5% RAPIDEZ LE CORTE DE 1 A 15

C LA T "STUDENT" PARA ALFA DE 0.025 ES 2.57

SUMX=0

SUMY=0

READ 1,(X(I),I=1,N)

READ 1,(Y(I),I=1,N)

DO 30 I=1,N

SUMX=SUMX+X(I)

SUMY=SUMY+Y(I)

30 CONTINUE

XMED=SUMX/N

YMED=SUMY/N

PFINT 15

PRINT 2,XMED

PRINT 3,YMED

PRINT 4

PRO=0

CUA=0

DIF=0

DIE=0

DO 40 I=1,N

PROXY(I)=X(I)*Y(I)

CUAX(I)=X(I)**2

DIFX(I)=(X(I)-XMED)**2

DIEY(I)=(Y(I)-YMED)**2

PRINT 5,X(I),Y(I),PROXY(I),CUAX(I),LIFX(I),DIEY(I)

PRO=PRO+PROXY(I)

CUA=CUA+CUAX(I)

DIF=DIF+DIFX(I)

DIE=DIE+DIEY(I)

```

40 CONTINUE
PRINT 6
PRINT 7
PRINT 8,SLMX,SLMY,PRO,QUA,UI,LIL
A=(SLMX*SLMY)/LIL
L=(SLX**2)/LIL
BET=(FNU-A)/(CLH-I)
ALF=YMED-(BET*XMED)
ROBET=(SQR(CLH/I*LIL))
PFINT 9,LLT
PRINT 10,ALF
PRINT 11,IU
C ALF Y BET SON LA CUELTADA AL ORIGEN Y LA PENDIENTE DE LA RECTA DE REGRESION.
C PU ES EL COEFICIENTE DE CORRELACION
C HASTA AQUI LA PRUEBA DE CORRELACION
PRINT 12
PRINT 13
BUT=BET**2
VARE=(1.0/(FLOAT(N)-2.0))*(DIF-(BUT*DIF))
DO 50 I=1,N
VARI(I)=VARE*(1.0/(FLOAT(N)))+(((X(I)-XMED)**2)/DIF))
LESV(I)=SQR(VARI(I))
DEST(I)=STU*LESV(I)
DBS(I)=ALF+(BET*X(I))
ESMAX(I)=DBS(I)+DEST(I)
ESMIN(I)=DBS(I)-DEST(I)
PRINT 14,X(I),VARI(I),LESV(I),DEST(I),DBS(I),ESMAX(I),ESMIN(I)
50 CONTINUE
55 CONTINUE
C HASTA AQUI LA PRUEBA DE LOS LIMITES DE CONFIANZA
1 FORMAT(8F10.3)
15 FORTAT(//,5X,"PRUEBA DE CORRELACION")
2 FORMAT(//,20X,"X MEDIA =",F7.3)
3 FORMAT(//,20X,"Y MEDIA =",F9.3)
4 FORMAT(//,14X,"X(I)",5X,"Y(I)",5X,"X(I)*Y(I)",5X,"X(I)**2",2X,"(1X(I)-XMED)**2",2X,"(Y(I)-YMED)**2")
5 FORMAT(5X,6F13.3,/)
6 FORMAT("-----")
1-----")
7 FORMAT(2X,"TOTAL")
8 FORMAT(5X,6F13.3)
9 FORMAT(//,20X,"LETA =",F13.5)
10 FORMAT(//,20X,"ALFA =",F13.5)
11 FORMAT(//,20X,"COEFICIENTE DE CORRELACION =",F13.5)
12 FORMAT(1H1,//,5X,"LIMITES DE CONFIANZA")
13 FORMAT(//,14X,"X(I)",8X,"VARY(I)",6X,"DESY(I)",5X,"T*ESY(I)",6X
1,"PRUEBAS",6X,"ESPAÑA",6X,"ESPAÑA")
14 FORMAT(5X,7F13.3,/)
80 FORTAT(1H1,5X,"ESTADISTICA DE DURBIN Y WATSON")
16 FORMAT(//,14X,"X(I)",8X,"L(I)",8X,"L(I)**2",5X,"(E(I)-E(I-1))",8
12X,"(E(I)-E(I-1))**2")
17 FORMAT(//,5X,5(F13.3),/)
18 FORMAT(3IX,F13.3,I3X,F13.3)
19 FORMAT(//,20X,"D =",F13.5)
20 FORMAT(//,20X,"PC =",F13.5)
CALL EXIT
END

```

```

FORMAT
FORMAT
SEG

```